

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Володимир,
ЄРЕМЕНКО

«___» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Метрологія та вимірювальна техніка»
зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
на тему: «Спеціалізована інформаційно-вимірювальна система контролю
повітряного зазору
між ротором та статором електричних машин»**

Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи ПВ-91мп

Підчібій Олександра Євгенівна _____

Науковий керівник:

Завідувач кафедри ІВТ, д.т.н., професор

Єременко Володимир Станіславович _____

Консультант з розділу «Стартап-проект»:

Доцент, д.е.н., доцент,

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

Професор, д.т.н., професор,

Куц Юрій Васильович _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Приладобудівний
(спеціалізація)

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій
(назва кафедри)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 152. Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
В.С. Єременко
(підпис) (ініціали, прізвище)
« » 20 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Підчібій Олександрі Євгенівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Спеціалізована інформаційно-вимірювальна система контролю повітряного зазору між ротором та статором електричних машин

науковий керівник дисертації Єременко Володимир Станіславович
д.т.н. професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « » 20 р. №

2. Строк подання студентом дисертації 07.12.2020р.

3. Об'єкт дослідження процес діагностування генеруючого обладнання електричних станцій

4. Предмет дослідження методи, моделі сенсорів та інформаційно-вимірювальна система діагностування потужних гідрогенераторів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Проведення аналізу методів та засобів контролю повітряного зазору між ротором та статором потужних електричних машин. Розробка імітаційної моделі сенсора та дослідження його характеристик. Розробка структурної схеми спеціалізованої системи та її компонентів. Проведення експериментальних досліджень. Розробка стартап проєкту.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 5 аркушів

7. Орієнтовний перелік публікацій публікація у XV Науково-практичній конференції "Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні", публікація, яка входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus, Web of Science – «Приборы и методы измерений».

8. Консультанти розділів дисертації

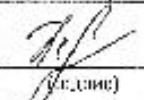
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видан	завдання прийняв
Стартап - проєкт	Бояринова К.О., д.е.н. доцент		

9. Дата видачі завдання 01.09.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз методів та засобів контролю повітряного зазору	01.09.2020 – 18.09.2020	
2	Аналіз та дослідження характеристик сенсора повітряного зазору	21.09.2020 - 09.10.2020	
3	Розробка спеціалізованої системи	12.10.2020 - 23.10.2020	
4	Розробка компонентів системи	26.10.2020 – 06.11.2020	
5	Експериментальне дослідження системи	09.11.2020 – 13.11.2020	
6	Розробка стартап-проєкту	16.11.2020 - 27.11.2020	
7	Оформлення матеріалів до магістерської дисертації	01.12.2020 - 07.12.2020	

Студент


(підпис)

О.С. Підчій

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник


(підпис)

В.С. Єременко

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел з 52 найменувань, двох додатків та містить 44 рисунків, 35 таблиць. Обсяг магістерської дисертації складає 122 сторінок, з яких перелік посилань займає 5 сторінки, додатки — 28 сторінок.

Обґрунтування вибору теми дослідження.

На сьогодні ефективний контроль повітряного зазору в гідрогенераторах є досить актуальною та перспективною задачею вирішення якої дозволяє підвищити надійність роботи гідрогенераторів, а також значно скоротити час простоїв, пов'язаних з незапланованим ремонтом.

Для вирішення задачі контролю повітряного зазору в гідрогенераторах перспективним є створення сучасних спеціалізованих інформаційно-вимірювальним систем діагностування. При цьому для отримання інформаційних сигналів та їх обробки системи діагностування мають містити наступні компоненти: комплекс контрольованих параметрів, комплекс методів контролю цих параметрів та комплекс обладнання для реалізації цих методів.

Всі ці компоненти взаємопов'язані і недоліки кожного з них знижують загальну ефективність функціонування систем діагностування генераторів в цілому. Вдосконалення будь-якого з цих компонентів сприяє підвищенню ефективності роботи системи контролю та діагностики електрообладнання. Одним із основних елементів систем діагностування, що визначають їх метрологічні характеристики — є первинні вимірювальні перетворювачі(сенсори). В роботі в якості сенсора повітряного зазору використано ємнісний сенсор із компланарними електродами. При застосуванні сенсорів для їх конструкція та геометричні параметри оптимізуються із врахуванням конструктивних особливостей генератора. Це ставить задачу із отримання функції перетворення сенсору в залежності від його конструктивних характеристик (геометричних параметрів), встановлення впливу характеристик матеріалів (текстоліту FR4) з яких виготовляються сенсори та технологічних похибок, які мають місце виготовленні сенсору на його функцію перетворення, а також реалізації системи контролю повітряного зазору з врахування

результатів багатопараметрового контролю робочого середовища зони контролю повітряного зазору потужних гідрогенераторів.

Мета і завдання дослідження. Метою магістерської дисертаційної роботи є розробка та дослідження імітаційної моделі ємнісного датчика вимірювання повітряного зазору, а також розробка спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи контролю повітряного зазору між ротором та статором електричних машин.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналітичний огляд методів та засобів вимірювання повітряного зазору між ротором та статором потужних гідрогенераторів;
- розробити математичну модель, виготовити та провести експериментальне дослідження первинного(сенсора) вимірювального перетворювача для інформаційно-вимірювального каналу визначення параметрів повітряного зазору системи, у якому, на відміну від відомих сенсорів використовується компланарно-паралельне розміщення робочих електродів;
- розробити структурну схему системи контролю повітряного зазору, яка дозволяє враховувати вплив робочого середовища потужних генераторів на визначення значення повітряного зазору;
- розробити елементи дослідного зразка вторинного вимірювального перетворювача, який може працювати у різних режимах роботи гідрогенераторів.

Об'єкт дослідження – процес діагностування генеруючого обладнання електричних станцій (на прикладі капсульного гідрогенератора СГК 538/160-70М).

Предмет дослідження – методи, моделі сенсорів та інформаційно-вимірювальна система діагностування потужних гідрогенераторів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися: методи чисельного моделювання з використанням персонального комп'ютера, методи теорії ІВС, теорія діагностики об'єктів і систем, теорія ймовірностей.

Наукова новизна одержаних результатів, полягає в тому, що набули подальшого розвитку методи дослідження ємнісних сенсорів, що дозволило

визначити вплив конструктивних характеристик (геометричних параметрів), характеристик матеріалів (текстоліту FR4) з яких виготовляються сенсори та технологічних похибок, які мають місце виготовленні сенсору на функцію перетворення сенсора.

Дана робота проводилась відповідно з держбюджетною темою «Розробка наукових засад створення нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання контрольно-діагностичних параметрів обладнання електростанцій» (шифр «ПАРАМЕТР», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №11 від 05.07.2016 р.), 2017 – 2021 рр., №ДР 0116U007285 Інституту електродинаміки Національної академії наук України.

Статті опубліковані: в збірнику праць XV Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» 2019 року, в збірнику матеріалів XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» 2020 року, в збірнику тез 7-ї міжнародної науково-технічної конференції «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов» 2020 року, а також у виданні, який входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus, Web of Science: журнал «Приборы и методы измерения». Том 11.

Ключові слова: повітряний зазор між статором та ротором, компланарний ємнісний сенсор, гідрогенератор, метод скінчених елементів, модель, система.

ABSTRACT

The dissertation consists of an introduction, five sections, a conclusion, a list of sources used with 52 titles, two appendices and contains 44 figures, 35 tables. The volume of the master's dissertation is 122 pages, of which the list of references is 5 pages, appendices - 28 pages.

Rationale for choosing a research topic.

Today, effective control of the air gap in hydro generators is a very important and promising task which allows to increase the reliability of hydro generators, as well as significantly reduce downtime associated with unscheduled repairs.

To solve the problem of air gap control in hydrogenerators, the creation of modern specialized information and measuring diagnostic systems is promising. In this case, to obtain information signals and their processing, the diagnostic system must contain the following components: a set of controlled parameters, a set of methods for controlling these parameters and a set of equipment for the implementation of these methods.

All these components are interconnected and the disadvantages of each of them reduce the overall efficiency of the diagnostic systems of generators in general. Improving any of these components helps to increase the efficiency of the control system and diagnostics of electrical equipment. One of the main elements of diagnostic systems that determine their metrological characteristics - are the primary measuring transducers (sensors). A capacitive sensor with coplanar electrodes was used as an air gap sensor. When using sensors for their design and geometric parameters are optimized taking into account the design features of the generator. This sets the task of obtaining the conversion function of the sensor depending on its design characteristics (geometric parameters), establishing the influence of the characteristics of materials (textolite FR4) from which sensors are made and technological errors that occur in the manufacture of the sensor on its conversion function. air gap taking into account the results of multi-parameter control of the working environment of the air gap control zone of powerful hydrogenerators.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the master's dissertation is to develop and study a simulation model of a capacitive sensor for measuring the air gap, as well as to develop a specialized information and measurement system for monitoring the air gap between the rotor and stator of electric machines.

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

- to conduct an analytical review of methods and means of measuring the air gap between the rotor and the stator of powerful hydrogenerators;

- to develop a mathematical model, to make and conduct an experimental study of the primary (sensor) measuring transducer for the information-measuring channel for determining the parameters of the air gap of the system, which, unlike known sensors uses coplanar- parallel placement of working electrodes;
- to develop a block diagram of the air gap control system , which allows to take into account the influence of the working environment of powerful generators on determining the value of the air gap;
- to develop an element and a prototype of a secondary measuring transducer that can operate in different modes of operation of hydrogenerators.

The object of research - the process of diagnosing the generating equipment of power plants (on the example of the capsule hydrogenerator SGK 538 / 160-70M) .

Subject of research - methods, models of sensors and measuring information and systems and diagnostics powerful hydro .

Research methods. To solve the tasks set in the work were used: methods of numerical simulation using a personal computer, methods of IBS theory, theory of diagnostics of objects and systems, probability theory.

The scientific novelty of the obtained results is that further developed methods of research of capacitive sensors, which allowed to determine the influence of design characteristics (geometric parameters), characteristics of materials (textolite FR4) from which sensors are made and technological errors that occur in the manufacture of sensors. sensor conversion function.

This work was carried out in accordance with the state budget theme "Development of scientific principles for creating new and improving existing methods and tools for measuring control and diagnostic parameters of power plant equipment" (code "PARAMETER", approved by the Bureau of VFTPE NAS of Ukraine Ave. , 2017 - 2021, GDR 0116U007285 of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The articles are published : in the collection of works of the X V Scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Efficiency of engineering solutions in instrument making" in 2019 , in the collection of materials of the XIX International scientific-practical conference " Renewable energy and energy efficiency in the XXI century" year, a collection of abstracts of the 7th international scientific-technical conference " Modern methods and gears control qualities and diagnostic STATU

S objects " 2020 year and in the publication, which is included in the international scientometric database Scopus , Web of Science : journal " Devices and measurement methods ". Volume 11.

Keywords: air gap between stator and rotor, coplanar capacitive sensor, hydrogenerator, finite element method, model , system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ МІЖ РОТОРОМ ТА СТАТОРОМ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	14
1.1. Об'єкт дослідження та його загальна характеристика	14
1.2. Вплив параметрів повітряного зазору на експлуатаційні характеристики потужних гідрогенераторів (ПГГ)	15
1.3. Сучасний стан розвитку засобів та методів вимірювання параметрів повітряного зазору в ПГГ	17
1.3.1. Аналітичний огляд систем з ІВК контролю, моніторингу та діагностики параметрів повітряного зазору	17
1.3.1.1. Системи з перетворювачами магнітного типу	18
1.3.1.2. Системи з перетворювачами ультразвукового типу	20
1.3.1.3. Системи з перетворювачами оптичного типу	21
1.3.1.4. Системи з перетворювачами ємнісного типу	24
1.3.1.5. Аналітичний огляд сучасних сенсорів повітряного зазору ємнісного типу	34
1.4. Аналітичний огляд програмних засобів мультифізичного моделювання	44
Висновки до Розділу 1	49
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА	51
2.1. Принцип вимірювання повітряного зазору ємнісними сенсорами	51
2.2. Конструкція ємнісного сенсора для вимірювання ПЗ	54
2.3. Визначення функції перетворення ємнісного сенсору ПЗ	55
2.4. Комп'ютерна модель ємнісного сенсору	57
2.5. Дослідження впливу технологічних факторів на функцію перетворення ємнісного сенсору	62
2.5.1. Дослідження впливу міжелектродного зазору на функцію перетворення ємнісного сенсору	62
2.5.2. Дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення ємнісного сенсору	64
2.5.3. Дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення ємнісного сенсору	67

2.6. Порівняння результатів дослідження моделі сенсору з результатами аналітичних розрахунків	70
Висновки до Розділу 2.....	72
РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ ПОТУЖНИХ ГЕНЕРАТОРІВ.....	73
3.1. Визначення вимог до системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів	73
3.2. Структурна схема системи.....	74
3.3. Канал вимірювання температури.....	76
3.4. Канал вимірювання магнітного поля.....	77
3.5. Канал вимірювання повітряного зазору	78
3.5.1. Вторинний вимірювальний перетворювач	79
3.5.2. Обґрунтування та вибір АЦП.....	82
3.5.3. Мікроконтролер	85
Висновки до Розділу 3.....	88
РОЗДІЛ 4. ЕКСПРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІВК ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ	89
4.1. Параметри та технічна характеристика макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ.....	90
4.2. Схема проведення експериментальних досліджень компонентів макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору ІВС контролю ПЗ	91
4.3. Аналіз та результати випробувань макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору ІВС контролю ПЗ.....	93
Висновки до Розділу 4.....	96
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «СПЕЦІАЛІЗОВАНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЗМІНИ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ МІЖ РОТОРОМ ТА СТАТОРОМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН»	97
5.1. Опис ідеї проекту.....	97
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту	101
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	102
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	111
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	114
Висновки до Розділу 5.....	119
ВИСНОВКИ.....	121

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	123
ДОДАТОК А	128
ДОДАТОК Б	132
ДОДАТОК В	142
ДОДАТОК Г	149
ДОДАТОК Д	156

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВВП- вторинний вимірювальний перетворювач;

ГГ – гідрогенератор;

ГЕС – гідроелектростанція;

ІВК – Інформаційно-вимірювальний канал;

ІВС - інформаційно-вимірювальна система;

МК – мікроконтролер;

ПЗ – повітряний зазор;

C – ємність, Ф;

E – напруженість поля, В/м;

ϵ – відносна електрична проникність;

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму;

d_x - відстань між сенсором та заземленою поверхнею (полюсом ротора), мм.

V – напруга, В;

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ МІЖ РОТОРОМ ТА СТАТОРОМ ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

1.1. Об'єкт дослідження та його загальна характеристика

Повітряний зазор між ротором і статором є одним з найважливіших параметрів, який використовують для моніторингу функціонального стану потужних електричних машин. Адже, саме в повітряному зазорі механічна енергія обертання перетворюється в електричну енергію, а його величина є порівняно невеликою в порівнянні з діаметром розточення статора. Тому його аналіз параметрів повітряного зазору генератора допомагає виявити надто близьке положення ротора по відношенню до статора, наявність неврівноважених сил всередині машини, нециліндричність форми ротора та статора, дефекти пластин статора, ексцентриситет і т. п.

Розрізняють два методи оцінки параметрів повітряного зазору – статичний та динамічний методи. До статичного методу відносять вимірювання повітряного зазору в діаметрально протилежних точках, а його оцінку визначають за даними вимірювання форм ротора та статора під час планових ремонтних робіт.

Відповідно до [1] визначення форм ротора і статора гідрогенераторів необхідно проводити при кожному капітальному ремонті, але не рідше, ніж 1 раз на 5 років, а також у разі виникнення підвищених низькочастотних вібрацій сердечника статора і хрестовини, биття валу і температури сегментів напрямних підшипників. Якщо передбачається проведення роботи по виправленню форм ротора і статора, то вимір їх форм необхідно проводити двічі: перед ремонтом і повторно після нього.

Оцінка рівномірності повітряного зазору здійснюється з урахуванням статичних і динамічних форм, а також величин биття валу. При підвищеному битті валу, пов'язаному з наявністю дефектів валопроводу або вузлів гідротурбінного обладнання («злам» валу, небаланси вузлів в проточній частині та ін.). Визначення форм ротора і статора проводиться після усунення причини биття валу.

Головним недоліком даного методу є низька достовірність оцінки, високі вимоги до кваліфікації персоналу, необхідність зупинки гідроагрегату для процедури контролю.

До динамічного методу відносять контроль повітряного зазору між ротором і статором гідрогенератора, коли він знаходиться в будь-якому зі своїх робочих режимів за допомогою різноманітних сенсорів, вибір яких залежить від конструкції машини, її розмірів та умов експлуатації. Отримані дані під час динамічного режиму є більш розгорнутими і достовірними, можна сказати, абсолютно відмінними від статичного методу.

Даний метод був вперше запроваджений, щоб уникнути наслідків простою машин, що можуть призвести до вартісних втрат. Інші переваги застосування методу:

- надання допомоги в обслуговуванні і плануванні технічного обслуговування великих гідроелектричних генераторів;
- надання інженерному персоналу цінних динамічних даних для аналізу;
- відсутня необхідність зупинки агрегатів та безпосереднього втручання інженерів.

1.2. Вплив параметрів повітряного зазору на експлуатаційні характеристики потужних гідрогенераторів (ПГГ)

Величина повітряного зазору в значній мірі визначає характеристики генератора і його поведінку в процесі експлуатації, що істотно впливає на:

- величину торцевих магнітних потоків і спричинених ними втрат в крайніх пакетах сердечників і натискних плитах статора;
- вібраційний стан машини при експлуатації;
- появи додаткових втрат і нагрівань;
- розподілу магнітного поля, електрорушійної сили і струмів у фазах обмотки статора, оскільки вісі фаз трифазної обмотки статора розташовані відносно нерівномірного повітряного зазору гідрогенератора (ГГ) під різними кутами, і, як

наслідок, появи вищих гармонійних складових, що призводить до збільшення втрат в сталі і зниження ефективності роботи ГГ;

- нерівномірність нагрівання пакетів статора і полюсів ротора;
- електромагнітні сили взаємного тяжіння статора і ротора;
- перерозподіл внутрішніх напружень;
- появу недоліків конструкції елементів кріплення статора та рухливих елементів ротора (наприклад: підшипників) [3].

Під час експлуатації ГГ величина зазору може змінюватися, що пов'язано з рядом причин:

- динамічні коливання ротора і його частин під час роботи, тобто процеси вібрації;
- зміщення осі ротора щодо осі статора - ексцентриситет;
- нахил осей ротора і статора один-щодо одного
- статична і динамічна деформація ротора генератора агрегату;
- полюса ротора можуть бути встановлені не точно по колу і можуть зміщуватись в процесі експлуатації;
- нахил окремих полюсів ротора через нерівномірні деформації;
- температурні деформації елементів ротора і статора.

Окрім вище перерахованих причин зміни повітряного зазору існують ще основні конструктивні дефекти, які призводять до спотворення форми обвідної ротора і появи нерівномірності повітряного зазору між статором і ротором у ГГ [2,3]:

1) *нециліндричність ротора*, що виникає через технологічні похибки при виготовленні і складанні ротора, коли окремі його полюси можуть відрізнятися за висотою;

2) *нециліндричність розточення статора*, яка виникає через складність забезпечення ідеальної форми циліндричної форми поверхні розточення статора при його виготовленні, складанні та під час тривалої експлуатації через значні радіальні розміри ГГ. Крім цього, на статор діють інтенсивні вібромеханічні навантаження та температура, що призводять до ослаблення механічної стійкості його конструкції.

Так, наприклад, статори ГГ капсульного типу деформуються через гідродинамічні удари та значну різницю температур ззовні та усередині капсули;

3) *ексцентриситет ротора*, під яким розуміють порушення співвісного розташування вісі центру симетрії статора, вісі симетрії ротора і вісі обертання ротора.

Перераховані фактори, як і порушення технології складання й виготовлення вузлів ГГ є причинами виникнення зміни повітряного зазору в процесі експлуатації ГГ.

1.3. Сучасний стан розвитку засобів та методів вимірювання параметрів повітряного зазору в ПГГ

1.3.1. Аналітичний огляд систем з ІВК контролю, моніторингу та діагностики параметрів повітряного зазору

Використання ІВК контролю, моніторингу та діагностики параметрів повітряного зазору в складі систем технічної діагностики генеруючого обладнання дають можливість ефективно визначати дефекти на ранній стадії їх розвитку за допомогою первинних перетворювачів, які контролюють механічні величини в різних місцях агрегату. Класифікація типів сенсорів, що використовуються в таких системах наведено на рис 1.1.

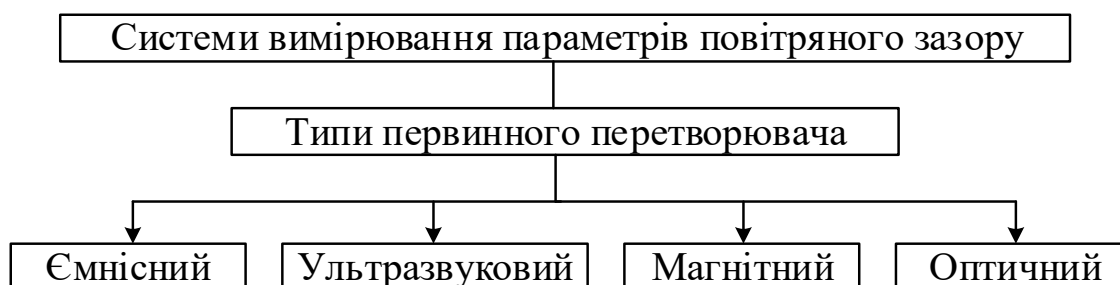


Рис.1.1 Класифікація типів сенсорів

Практично всі типи сенсорів повітряного зазору можуть застосовуватися для проведення діагностики в динамічному режимі роботи електричних машин. При

цьому вибір сенсору для вимірювання повітряного зазору насамперед визначається конструкцією машини, її розмірами, умовами експлуатації, необхідною точністю, надійністю, ціною тощо.

Розглянемо більш детально системи які містять ІВК вимірювання повітряного зазору.

1.3.1.1. Системи з перетворювачами магнітного типу

Система моніторингу стану машини (MCM). Система моніторингу стану машини (MCM), від компанії KONCAR, Electrical Engineering Institute Inc. (Хорватія), представляє собою модульний комплекс який інтегрує ключові функції моніторингу в єдину платформу. Завдяки своїй модульності можна визначати власну сферу моніторингу та контролювати всі ключові елементи для оперативного реагування та захисту обладнання [4]. Система моніторингу MCM складається з таких блоків:

- Блок вимірювання вібрацій – вимірювання відносних вібрацій валу (щодо корпусу підшипника) та вимірювання абсолютних вібрацій;
- Блок вимірювання технологічних значень – значення процесів імпортується в системи моніторингу за допомогою стандартних протоколів зв'язку, таких як MODBUS, IEC 104 та інші. Найпоширенішими значеннями для імпорту є активна та реактивна потужності, струм та напруга генератора, температура та інші;
- Блок вимірювання швидкості обертання – вимірювання одного імпульсу за машинний оберт;
- Блок вимірювання повітряного зазору – моніторинг номінального, максимального, мінімального та середнього значень повітряного зазору;
- Блок моніторингу часткового розряду – складається з 3 муфт на генератор, встановлених на торцевій обмотці та блоці обробки, який аналізує дані, зібрані з муфт, встановлених поза корпусом генератора. Аналізовані дані надсилаються в інші системи за допомогою стандартного протоколу зв'язку, а також через аналогові виходи (4-20 мА).

- Блок гідравлічних значення, кручення валу, кута навантаження та будь-яких інших значень, які використовують стандартну вхідну напругу або струм.

Обробка сигналів виконується блоком обробки. Стандартні розрахунки, що проводяться системою МСМ, включають:

- Обчислення середніх значень (середньоквадратичне значення);
- Прогноз можливості зміни параметрів;
- Розрахунок тривоги (сигнал тривоги та попередження для кожного вимірюного / обробленого значення);
- Розрахунок максимальних значень;
- Розрахунок годографу;
- Фільтрація сигналів;
- Спектральний аналіз;
- Обчислення швидкості обертання.

Типова архітектура системи моніторингу стану машини (МСМ) представлена на рис.1.2.



Рис.1.2 Типова архітектура системи моніторингу стану машини (МСМ)

Система моніторингу стану машини (МСМ) – це повне рішення для прогностного обслуговування та управління активами великих машин; гнучка та модульна інтеграція із застосуваннями на заводі; широкий діапазон контрольованих

параметрів із швидкою обробкою вимірюваних величин; доступ на місці та в режимі онлайн із віддаленим моніторингом з будь-якого місця; розширені елементи для максимального захисту активів; раннє виявлення несправностей - виявлення несправностей на ранній стадії та зосередження на критичних деталях машини без спеціального діагностичного обладнання; розумний тренд – унікальна функція використовує вдосконалені алгоритми, які передбачають момент виникнення несправності, що робить її ідеальною для оптимізованого планування технічного обслуговування, а також автоматизована звітність – за допомогою автоматизованих звітів ви знайдете інформацію про стан машини, що значно економить їхній час.

1.3.1.2. Системи з перетворювачами ультразвукового типу

Дослідники інституту Сан Паоло (Бразилія) в своїй роботі [5] запропоновували нову динамічну систему контролю повітряного зазору на базі ультразвукового сенсора [6]. Дана система складається з двох блоків сенсорів та блоків обробки. Вимірювання повітряного зазору засноване на вимірі часу проходження ультразвукової хвилі по схемі «крок-пастка». Хвиля поширюється від випромінювача-перетворювача, встановленого у вентиляційному каналі статора, відбиваючись від поверхні ротора, і повертається до приймального перетворювача, встановленого на сусідньому вентиляційному каналі, як показано на рис.1.3.

Сенсори підключені до блоку обробки через два коаксіальних кабелі довжиною 15 метрів, які використовуються для включення ультразвукових перетворювачів, прийому їх ехо-сигналів, вимірювань температур поблизу повітряного зазору та електричного живлення датчиків.

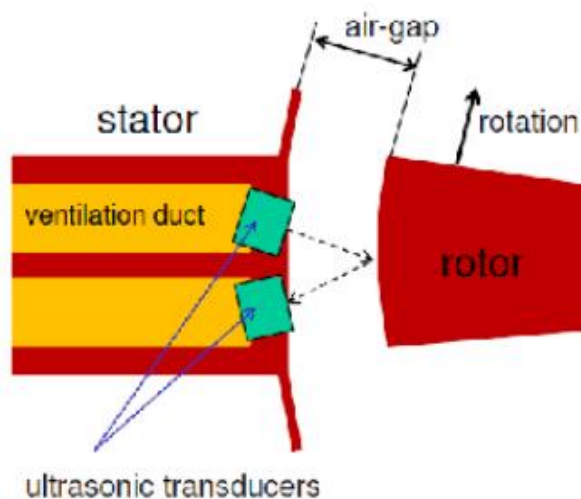


Рис. 1.3 Схема вимірювання повітряного зазору

Блок обробки має мікроконтролер (ARM LPC1768), підсилювач з програмованим посиленням, 12-бітний аналого-цифровий перетворювач для оцифровки ехо-сигналів і інтерфейси введення-виведення для зв'язку. Час відлуння польоту вимірюється за допомогою цифрового алгоритму перетину нуля з роздільною здатністю 0,2 мкс. Для вимірювання часу польоту двох комплектів перетворювачів використовується частота повторення 2 кГц. Мікроконтролер обчислює середнє значення двох польотів, виконує температурну корекцію швидкості поширення у повітрі та обчислює повітряний зазор відповідно до кута між випромінювачем та приймачем кожного сенсора. Значення повітряного зазору перетворюється на аналоговий сигнал від 4 до 20 мА. Вимірювальні параметри блоку обробки програмуються через стандартний послідовний інтерфейс RS485.

1.3.1.3. Системи з перетворювачами оптичного типу.

Комплекс лазерної діагностики динамічної форми ротора, форми статора і повітряного зазору гідрогенератора, запропонований інженерами групи зведеного планування виробничо-технічної служби ПАТ «РусГідро» - «Саратовська ГЕС» (Росія) - це мобільний комплекс обладнання та програмного забезпечення, що дозволяє проводити діагностику основних параметрів гідрогенератора (форма ротора, статора повітряного зазору і биття валів) [7, 8]. До складу комплексу входять сенсори

контролю форми ротора та биття валу, світлова мітка, робоча станція з програмним забезпеченням LSvision 3.0.

Вимірювання биття валу проводиться лазерними тріангуляційними датчиками з точністю до 0,03мкм. Контролюється в районі генераторного підшипника і турбінного підшипника. Встановлюється по 2 датчика в двох вертикальних площинах, розташованих під кутом 90° один до одного. Мітка положення полюса встановлюється під ротором, що обертається, на проти першого полюса. Вимірювання форми ротора проводиться датчиками, встановленими в розточенні через вентиляційний канал в пакеті активної сталі статора. Типова архітектура комплексу представлена на рис. 1.4.

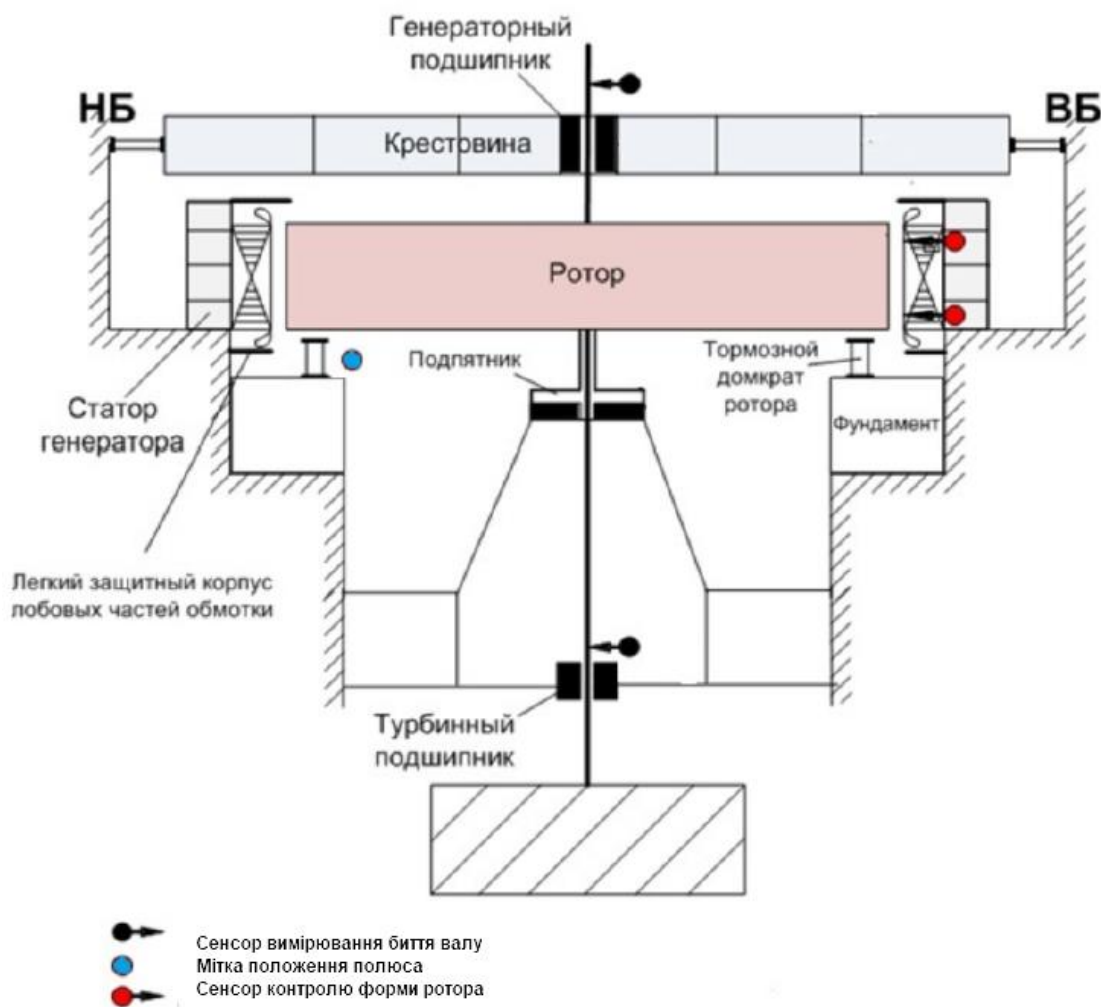


Рис. 1.4 Типова архітектура комплексу лазерної діагностики динамічної форми ротора, форми статора і повітряного зазору гідрогенератора

Для вимірювання геометрії обертового об'єкта (ротора) лазерний сенсор закріплюють нерухомо в вентиляційний канал осердя статора генератора (рис. 1.5).

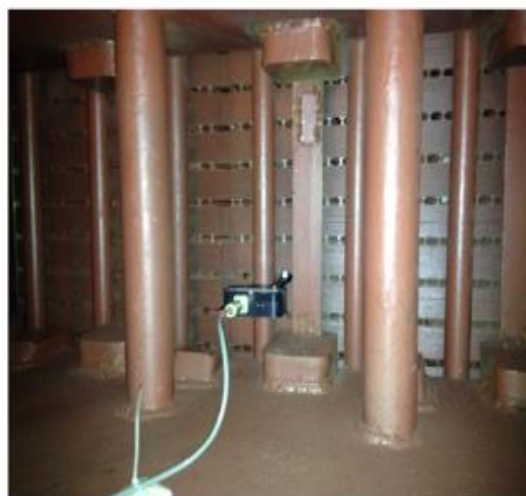
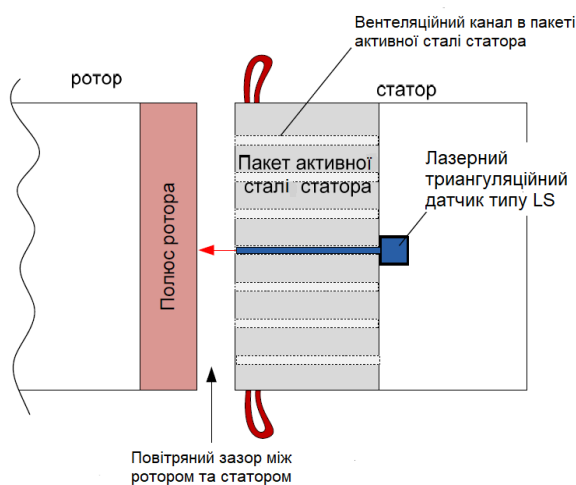


Рис. 1.5 Схема встановлення лазерного сенсора динамічного контролю форми ротора

Принцип дії сенсорів полягає в тому, що лазерний випромінювач створює світлову мітку на поверхні об'єкта. Зображення світлової мітки проектується на лінійний КМОП - фотоприймач. При зміні відстані від сенсора до об'єкта відбувається переміщення зображення світлової мітки в площині фотоприймача. Мікропроцесор здійснює обчислення координат зображення. За координатами зображення точки визначається відстань до об'єкта.

Для реалізації осереднення використовується сигнал з відмітника, що представляє собою оптичний модуль, що генерує синхросигнал, прив'язаний до початкової фази обертання ротора.

Система лазерної діагностики динамічної форми ротора гідроагрегату з використанням лазерних триангуляційних датчиків, дозволяє проводити прямі вимірювання геометрії об'єктів гідроагрегату через вузький протяжний вентиляційний канал пакету активної сталі осердя статора в реальному часі з високою точністю та без втручання в конструкцію генератора.

1.3.1.4. Системи з перетворювачами ємнісного типу

Система «Iris Power AGTracII». Система Iris Power AGTracII від компанії Iris Power LP (Канада) - це система машинного моніторингу, здатна контролювати повітряний зазор та обробляти параметри [9]. Система може бути використана для збору даних як постійної системи онлайн-моніторингу з можливістю захисту, а також з комп'ютером для перегляду даних у режимі реального часу під час введення в експлуатацію, експлуатації та / або обслуговування.

Система повітряного зазору складається з 5 частин:

- Ємнісні датчики повітряного зазору (від 4 до 16 датчиків)
- Формувач сигналу сенсора
- Датчик синхронізації (1 датчик)
- Інструмент постійного моніторингу
- Програмне забезпечення для управління даними.

AGTracII оцифровує сигнали від різних типів датчиків, а також:

- обробляє отримані сигнали в режимі реального часу;
- виявляє різні режими роботи машини: стаціонарний, запуск, нормальна робота, перехідний режим;
- визначає умови тривоги та надсилає сповіщення на заводську систему SCADA;
- спілкується із заводською системою SCADA;
- передає дані про стан в Програмне забезпечення управління даними.

Програмне забезпечення для управління даними забезпечує наступне:

- отримувати дані як вектор стану з модуля реального часу (RT) у заздалегідь встановлених часових послідовностях та перевіряти умови роботи.
- під час перехідного режиму роботи вектори стану реєструються із збільшенням часу.
- дуплексне спілкування з AGTracII.
- поява тривоги та сповіщення.

- запис даних, обробка та збереження даних у формі хвилі до бази даних, яка може бути використана для офлайн-аналізу.

Архітектура системи Iris Power AGTracII представлена на рис. 1.6.

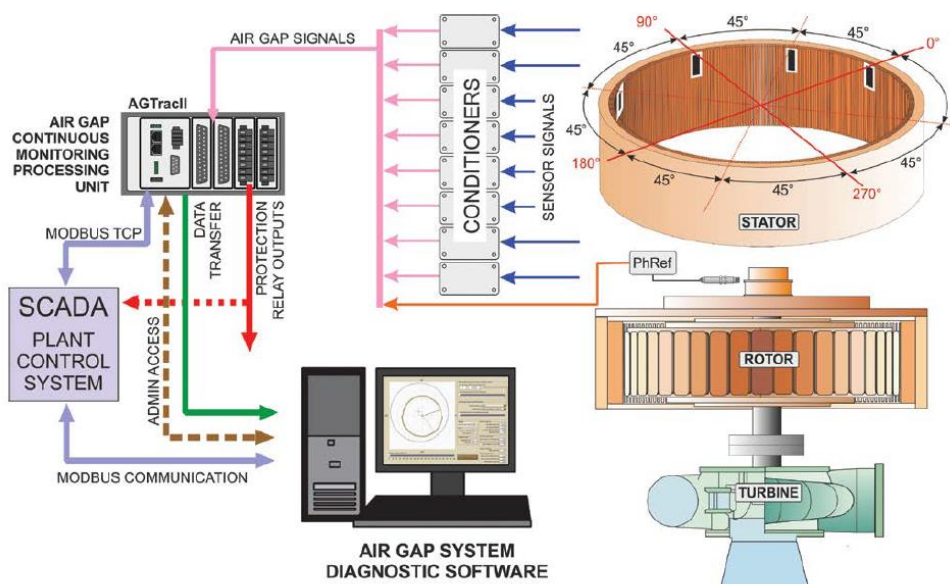


Рис.1.6 Архітектура системи Iris Power AGTracII

Програмне забезпечення для управління даними дозволяє оператору як мінімум виконувати наступне:

- відображення та друк даних;
- налаштування та конфігурація відповідно до даних одиниці;
- он-лайн постійний діагностичний моніторинг всіх вимірюваних сигналів;
- Налаштування бази даних на основі номера одиниці;
- Налаштування машинних даних.

Система захисту та моніторингу «3500». Система захисту та моніторингу серії 3500 від компанії Bentley Nevada Inc (США) має найбільш широким вибором параметрів вимірювань для даної галузі промисловості, а також дає унікальну можливість програмного конфігурування практично всіх опцій моніторів [10].

За допомогою модулів моніторингу системи 3500 можна настроїти вібрацію, температури підшипників, осьової зрушення, швидкість, повітряний зазор,

технологічні змінні (електричне навантаження, тиск масла, рівень заповнення резервуара і ін.) та інші виміри так, щоб вони виконували певні вимоги в порівнянні даних і аналізу кожного гідроагрегату на станції.

Відповідно до вимог за спеціальною фільтрації, формуванню сигналу і амплітудно-частотних характеристиках був розроблений модуль монітора 3500 / 46М для гідроагрегатів. У чотирьох каналному модулі канали можуть бути налаштовані на здійснення вимірювань або повітряного зазору, або радіальних вібрацій; монітор одночасно обробляє вхідні сигнали по кожному каналу в залежності від конфігурації наступним чином:

- радіальна вібрація (радіальні підшипники, положення кільцевого ущільнення, зазор лопаток в камері робочого колеса);
- загальна вібрація (пряма);
- відфільтрована вібрація IX і фаза;
- відфільтрована вібрація NX і фаза (де N - обирається користувачем ціле число між 2 і 20);
- амплітуда вібрації NOT IX;
- зазор в підшипнику (радіальне положення вала);
- комбіновані вимірювання;
- повітряний зазор генератора;
- миттєве значення повітряного зазору;
- середнє значення повітряного зазору;
- мінімальне та максимальне значення повітряного зазору;
- номер полюса, відповідний мініимальному повітряному зазору;
- номер полюса, який відповідає максимальному повітряному зазору.

Типова архітектура системи серії «3500» представлена на рис.1.7.

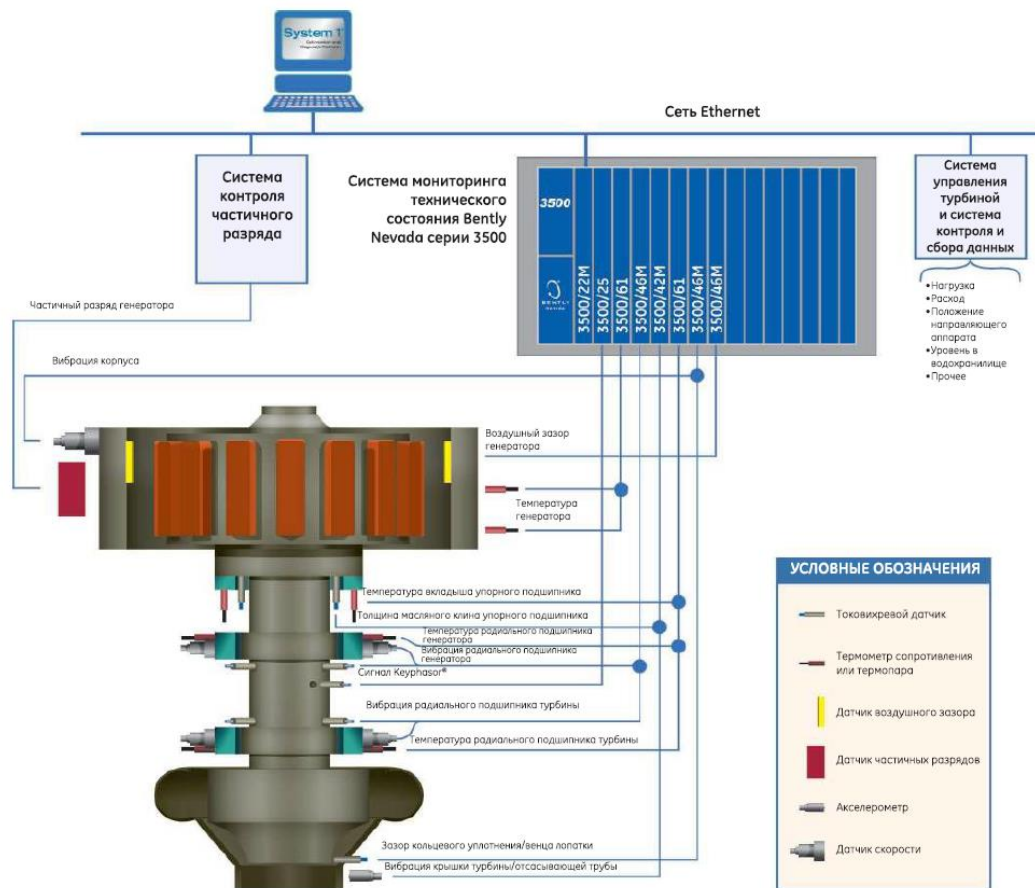


Рис. 1.7 Типова архітектура системи серії «3500»

Також до складу системи входить програмне забезпечення (ПЗ) System 1, що дозволяє аналізувати, відстежувати тенденції зміни, зіставляти і відображати дані по вібрації, положенню, температурі і будь-яких інших необхідним параметрам. В ПЗ присутні додаткові функції:

- Decision Support - це інструмент ПЗ System 1, його завданням є підтвердження правильності та аналізу зібраних даних на основі програмованих користувачем правил і інформації, виявлення електричних, механічних і гідродинамічних несправностей і видача рекомендацій Actionable Information * («Інформація до дії»);
- створення користувальницьких правил та пакет наборів експертних правил RulePak для певних типів машин.

На додаток до можливостей моніторингу стану обладнання System 1® також має зв'язок з додатками по організації обслуговування, інструментами забезпечення

надійності, управління техпроцесом, системою контролю і збору даних, системою архівних даних, різноманітними документальними ресурсами і т.п.

Система моніторингу «Air Gap Monitoring system». Система «Air Gap Monitoring system» від компанії MC-monitoring SA (Швейцарія) пропонує нове та ефективне рішення щодо захисту від вібрації та повітряного зазору для моніторингу електричних машин [11]. Завдяки випробуваному на місцях блоку збору даних PMS-100 Top Message, який використовується та перевірений у промисловій автоматизації та робототехніці, цей матеріал пропонує всі гарантії щодо надійності, надійності та експлуатаційних характеристик у промислових умовах.

Збір, моніторинг та аналіз сигналу повітряного зазору здійснюється сучасним компактним модулем. Можливе до восьми одночасно шістнадцяти одночасних каналів на установку DIN-рейки. Крім того, змінні процесу, такі як температура, навантаження та тиск, можуть відслідковуватися в той же час для кореляційних цілей. У такому випадку та залежно від номера каналу та вимог до моніторингу, ведений модуль можна додавати та з'єднувати між собою через CANBus. Цей автономний та мережевий пристрій здійснює постійний моніторинг сигналів повітряного зазору в усіх робочих умовах генератора.

Пристрій збору даних PMS-100 повністю програмується за допомогою RS-232 або Ethernet посилення, коли він підключений до ПК, на якому працює програмне забезпечення Bus Manager. Крім того, пристрій пропонує порт MODBUS для підключення до цифрової системи управління машини.

Посилання Ethernet, що використовує протокол TCP / IP, наданий модулем збору, дозволяє передавати дані там, де це потрібно локально, на робочий стіл та в мережу користувача. Програмне забезпечення PMS-100 Top Message, програмне забезпечення ProfiSignal та Vibrolab надають можливостей діагностики, необхідних функцій для ефективного моніторингу повітряного зазору в машині.

Типова побудова архітектури системи моніторингу «Air Gap Monitoring system» представлена на рис. 1.8.

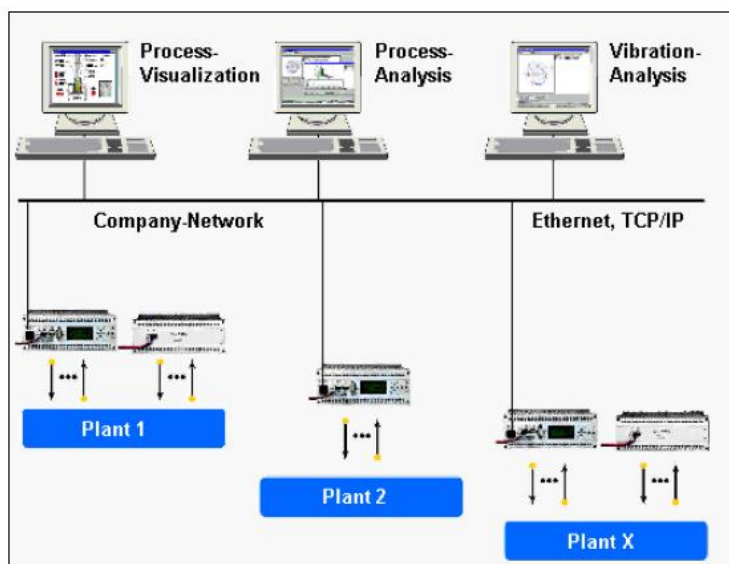


Рис.1.8 Типова архітектура системи «Air Gap Monitoring system»

Система інтелектуального контролю стану машинного обладнання «Smart Machinery Health Management». Багатофункціональна система інтелектуального контролю стану машинного обладнання «Smart Machinery Health Management» компанії Emerson Electric (США) на базі CSI 6500 Machinery Health Monitor має широкий діапазон вимірювальних перетворювачів і спеціально розроблена для гідравлічних турбін і гідрогенераторів [12].

Залежно від конструкції, потужності і частоти обертання машинного обладнання до системи можуть бути підключені різні спеціалізовані вимірювальні перетворювачі, в тому числі датчики абсолютного і відносного положення, повітряного зазору і часткового розряду, а також засоби абсолютного вимірювання, що включають перетворювачі частоти з високою чутливістю і вбудованими функціями фільтрації і перетворення сигналів, які особливо важливі для моніторингу гідроагрегатів з низькою частотою обертання.

Всі дані вимірювань передаються в систему CSI 6500, яка забезпечена найсучаснішими технічними рішеннями, необхідними для реалізації певних функцій моніторингу захисту та діагностування обладнання.

Загальний вид побудови архітектури та функціональних можливостей системи представлено на рис. 1.9.

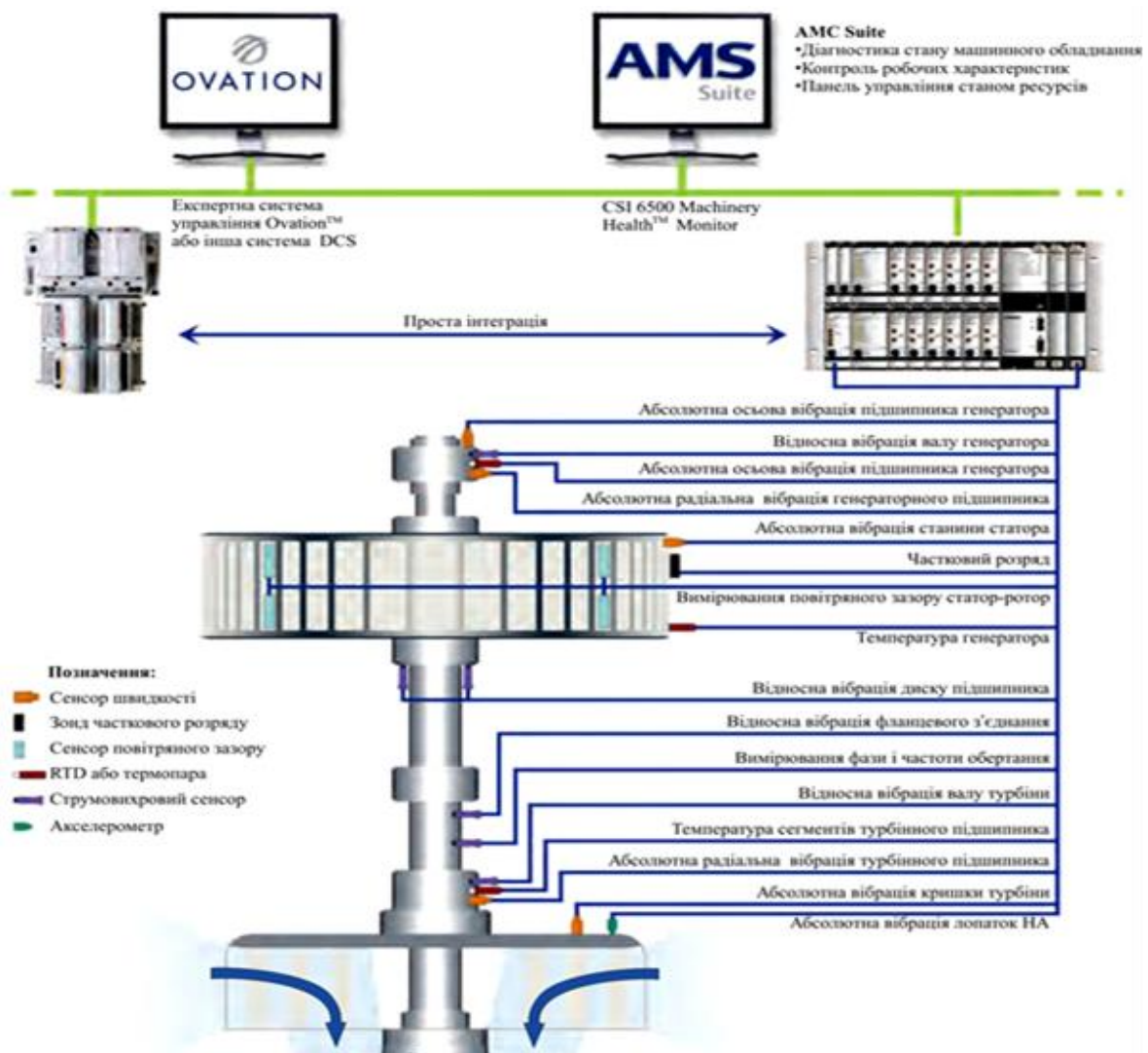


Рис.1.9 Система «Smart Machinery Health Management» на базі CSI 6500

Також система має програмне забезпечення AMS Suite з функцією контролю робочих характеристик, що забезпечує інформацію, необхідну для досягнення і підтримки їх оптимальності; можливістю визначати корінну причину неефективної роботи, так що можна буде спланувати необхідне технічне обслуговування; можливістю прогностичного моніторингу, що забезпечує передачу інформації в реальному часі в відділи експлуатації та технічного обслуговування.

Система моніторингу повітряного зазору «AGMS». Система моніторингу повітряного зазору «AGMS» на базі програмного забезпечення «ZOOM» компанії VibroSystM (Канада) призначена для тренда, аналізу, обслуговування та захисту всіх нових, відремонтованих та в користуванні машин [13]. До складу системи входять:

- вимірювальні ланцюги з ємнісними датчиками (плоскі, безконтактні, пасивні) VM серії, триаксіальними кабелями та кондиціонери серії LIN-300;
- багатоканальний пристрій збору даних ZPU-5000;
- конвертор інтерфейсів (RS-232);
- робоча станція з програмним забезпеченням ZOOM.

ZPU-5000 виконує різні типи вимірювань як в автоматичному, так і в ручному режимах. Він також обробляє дані, перевіряє умови тривоги та передає інформацію на сервер, на якому працює програмне забезпечення ZOOM, для швидкої інтерпретації даних про стан машини. ZPU 5000 використовує високошвидкісні протоколи зв'язку TCP / IP для зв'язку з сервером. Може синхронізувати отримання всіх параметрів з проходженням кожного полюса ротора для верхніх полюсних машин, що дозволяє відстежувати до 16 високошвидкісних входів (повітряний зазор, переміщення, вібрація тощо) від простою до надшвидкісних умов. Також можливо з'єднати додаткові ЗПУ, щоб розширити діапазон моніторингу та можливості.

Програмне забезпечення ZOOM Software Suite пропонує графічний інтерфейс користувача для перегляду та аналізу даних, управління тривогами з декількох одиниць збору, відображення зібраної інформації в режимі реального часу та спілкування із зовнішніми системами управління SCADA.

Типова архітектура системи моніторингу повітряного зазору «AGMS» представлено на рис.1.10.

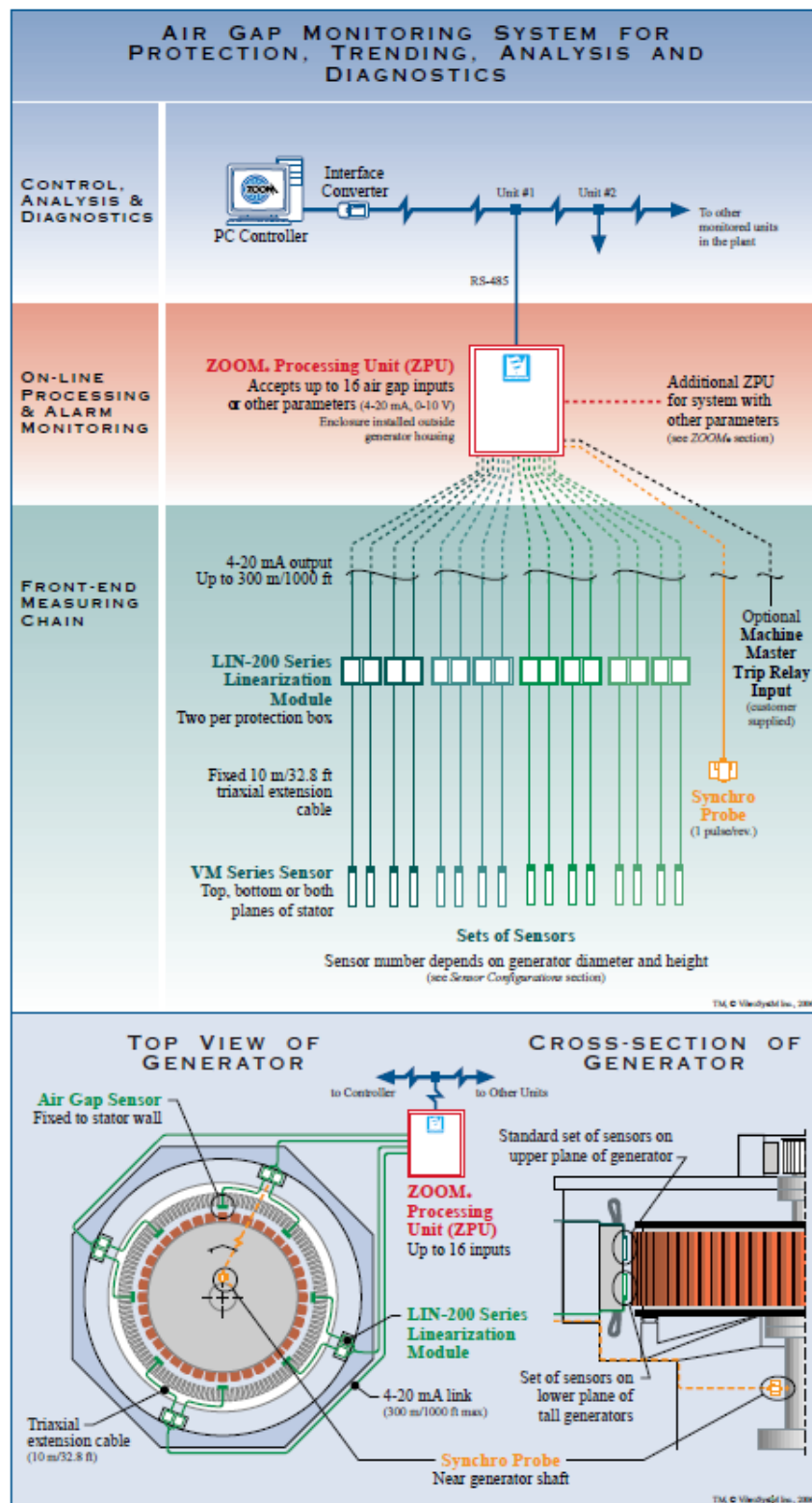


Рис.1.10 Система моніторингу повітряного зазору «AGMS»

В порівняльній таблиці 1.1 представлені основні технічні характеристики та функціональні можливості існуючих систем моніторингу/контролю повітряного зазору з перетворювачами ємнісного типу.

Таблиця 1.1

Основні технічні характеристики та функціональні можливості існуючих систем моніторингу/контролю повітряного зазору.

Назва системи	AGTracII	Система захисту та моніторингу серії 3500	Air Gap Monitoring system	Smart Machinery Health Management	AGMS
Країна виробник	Канада	США	Швейцарія	США	Канада
Ємнісні датчики повітряного зазору	Серії CGP	Серії 4000	Серії AGT	+	Серії VM
Модуль лінеаризації	Серії CGL	+	+	Серії A6620	Серії LIN
Кількість ємнісних вимірювальних каналів	4...16	4	8...16	Не зазначено	16
Датчик синхронізації	+	+	-	+	+
Струмовихровий датчик	-	+	-	+	-
Датчик температури	-	+	-	+	-
Датчик часткових розрядів	-	+	-	+	-
Датчик швидкості	-	+	+	+	-
Акселерометр	-	+	-	+	-
Датчик магнітного поля	-	-	-	-	-
Блок збору даних	AGTracII	3500 / 46M	PMS-100	CSI 6500	ZPU-5000
Тип інтерфейсу	TCP/ModBus	Ethernet	Ethernet/RS-232/ModBus	Не зазначено	RS-232
ПЗ системи	Air Gap System Diagnostic Software	System 1	Top Message/ProfiSignal/Vibrolab	AMS Suite	ZOOM Software Suite
Тип системи управління	SCADA	Не зазначено	Не зазначено	Ovation	SCADA

В результаті проведеного аналітичного огляду систем, які використовують ІВК контролю, моніторингу та діагностики повітряного зазору було показано, що найкращими системами є ті, що містять у своїй структурі канали з сенсорами ємнісного типу.

1.3.1.5. Аналітичний огляд сучасних сенсорів повітряного зазору ємнісного типу

4000 Series Air Gap Sensor. Вимірювачі повітряного зазору 4000 компанії "Bently Nevada Inc.", США, представлений на рис.1.11 [14].



Рис.1.11 Вимірювачі повітряного зазору 4000

Принцип дії вимірювачів повітряного зазору серії 4000 заснований на вимірюванні зміни ємності повітряного конденсатора, однією з обкладок якого є пластина датчика (сенсора), змонтованого всередині статора генератора, а другий - полюс ротора. Мінімальна величина і положення повітряного зазору і геометричні параметри ротора вимірюються безпосередньо під час роботи енергоблоку. При обертанні ротора відбувається періодична зміна відстані (повітряного зазору) між

обкладками конденсатора, що призводить до зміни його ємності. Зміна ємності перетвориться в зміну вихідної напруги, пропорційного величині зазору.

Даний датчик з діапазоном вимірювань 50 мм розрахований на забезпечення максимальної безвідмовності навіть в найжорсткіших умовах роботи в гідрогенераторах. Зонд здатний працювати в безперервному режимі, забезпечуючи задану точність вимірювань, при температурі до $+125^{\circ}\text{C}$ ($+257^{\circ}\text{F}$). Зонд зберігає здатність до точної і безперебійній роботі в умовах магнітних полів до 1,5 Тл, які часто виникають між полюсами ротора і статором. Щоб уникнути ослаблення різних з'єднань, зонди і подовжувальні кабелі стандартно комплектуються роз'ємами ClickLock™.

Вимірювачі повітряного зазору серії 4000 є вимірювачами параметричного типу і можуть працювати, починаючи з частоти рівною нулю (постійний вхідний сигнал).

Air Gap Transducer «AGT-212». Передавач повітряного зазору «AGT-212» компанії MC-monitoring SA, Швейцарія, представлений на рис.1.12 [15].



Рис. 1.12 Air Gap Transmitter «AGT-212»

Безконтактний ємнісний передавач повітряних зазорів (AGT) для вимірювання відстані між його базовою поверхнею та металевою цілью. Кожен передавач складається з датчика (AGS), адаптера повітряного зазору (AGA) та кондиціонера (AGC).

Кондиціонер забезпечує три вихідних сигналу:

- Напруга MinGap1 (V);
- Поліусна напруга профілю (V);
- Поліусний профіль або струм MinGap1 (mA).

Всі виходи є гальванічно-ізолюваними, а поточний вихід встановлений на заводі профілю поля. Цифрова технологія в поєднанні з компенсацією активної температури дозволяє лінеаризацію регулювати з великою точністю та роздільною здатністю, стабільною та повторюваною поведінкою. Промисловий металевий корпус дозволяє встановлювати в суворих умовах.

Датчик призначений для тривалих життєвих циклів, суворих середовищ та сильних магнітних полів. Форма датчика підходить для його встановлення на стінці статора генераторів і двигунів. Датчик підключений до адаптера повітряного зазору через гнучкий кабель і роз'єм, що дозволяє проходити через вентиляційні отвори. Цей кабель захищений на всю довжину гнучкими поліамідними трубами. Адаптер повітряного зазору підключається до кондиціонера через гнучкий кабель та 4-х полюсний роз'єм. Цей кабель захищений на всю довжину гнучким металевим каналом.

Основними перевагами даного передавача є:

- Моніторинг повітряного зазору від 2 до 12 мм;
- Знімний датчик через коаксіальний роз'єм $\varnothing 5$ мм для прокладки через вентиляційні отвори;
- Лінеаризація на основі DSP, що дозволяє підвищити точність та стабільність;
- Активна компенсація температури;
- Стійкий до сильного магнітного поля.

Capacitive Air Gap Measuring Chains «VM3.12». Вимірювальний ємнісний ланцюг повітряного зазору з датчиком типу «VM3.12» компанії VibroSystM, Канада, представлений на рис.1.13 [16].



Рис. 1.13 Вимірювальний ємнісний ланцюг повітряного зазору з датчиком типу «VM3.12»

Вимірювальні ланцюги повітряного зазору VM складаються з пасивних, безконтактних датчиків, які вимірюють відстань між їх поверхнею та металевою ціллю. Первинний сигнал, підхоплений ємнісним датчиком повітряного зазору VM3.12, надсилається на кондиціонер серії LIN™ -300 через триаксіальний подовжувальний кабель для перетворення в лінеаризований сигнал від 4 до 20 мА. Потім весь ланцюг з'єднується з блоком збору даних через роз'єм M12 та сигнальний кабель. Датчик кріпиться до накладок статора паралельно до полюсів ротора, а з'єднувальний кабель кріплять до серцевини статора та покривають кремнієм для захисту. Ці датчики захищені від сильних магнітних полів.

Датчик повітряного зазору «AGS». Датчик типу «AGS» компанії Mikrotrend, Хорватія - це ємнісний прилад для вимірювання відстані, призначений, але не обмежуючись для генераторів з повітряним охолодженням та електродвигунів. Підходить для вимірювання зазору, геометрії ротора і статора, виявлення коротких замикань обмотки тощо [17]. На рис.1.14 представлено зовнішній вигляд датчика.



Рис. 1.14 Датчик повітряного зазору типу «AGS»

Завдяки високій чутливості, високій роздільній здатності, температурній стійкості та низькому шуму, можливо надійно виміряти відстань з роздільною здатністю до 20 мікрометрів (при надмірному уборі).

Особливості датчика:

- унікальний тип крайового кріплення для вітрогенераторів та електродвигунів з дуже малим повітряним зазором;
- датчик з вуглецевими частинками FR4 з високою стійкістю, зроблений для встановлення глибокої внутрішньої чи крайової установки, встановлення статора або ротора;
- стабільна робота в широкому діапазоні температур від -20 ... 125/140 ° C (сенсорний зонд);
- корпус електроніки, захищений від брызок (IP66), добре підходить для польових додатків;
- несприйнятливий до магнітних полів, пилу та парів нафти, EMI, RFI.

Ємнісний датчик «CS25». Ємнісний датчик типу «CS25» компанії Sonosics Ltd, Великобританія, представлений на рис. 1.15 [18].



Рис.1.15 Ємнісний датчик типу «CS25»

Датчик повітряного зазору CS25 від Sensonics - це безконтактний динамічний перетворювач положення, що використовує ємнісну техніку для забезпечення точного вимірювання переміщення від торця датчика до металевої мішені. Перевага ємнісного методу в генераторних додатках - високий імунітет до магнітних полів; CS25 також забезпечує високу роздільну здатність та відносну нечутливість до різних (металевих) цільових матеріалів.

Датчик виконаний в надійній смуговій механічній конструкції для кріплення на стінку статора, інтегральний коаксіальний кабель проходить через стінку статора або через вентиляційні отвори до водія, який подає сигнал передачі для виявлення смуги і приймача. Лінеаризований оптико-ізолюваний вихід подається у форматі напруги та струму, який може бути налаштований для відображення різних вимірювань полюсів ротора відносно статора.

Датчик повітряного зазору «EQ 2431-A». Датчик повітряного зазору EQ 2431-A (рис.1.16) [19] компанії виробника Brüel & Kjær Vibro, Германія - це безконтактна вимірювальна перетворювальна система високої точності, високої лінійності та високої стійкості. Завдяки дуже вузькому профілю конструкції датчик може бути встановлений на стінці статора генератора та електродвигуна, що має повітряний

зазор в межах від 5 до 25 мм. Датчик, розміщений на статорах, вимірює відстань між його поверхнею та цілью за принципом ємнісного вимірювання. Ця нова конструкція перетворювачів повністю виключає вплив кабелю сигналу.

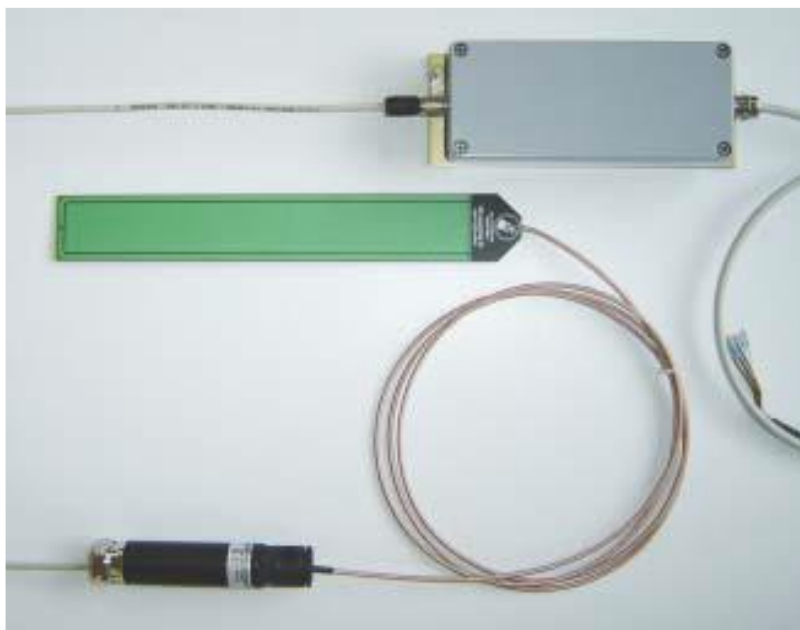


Рис. 1.16 Датчик повітряного зазору «EQ 2431-A»

Система перетворювача складається з датчика з вбудованим гнучким тривісним кабелем на 2 метри, що закінчується коаксіальним роз'ємом невеликого розміру. 2-метровий тривісний кабель захищений по всій довжині гнучким поліамідним трубопроводом, підключеним до адаптерного модуля, що закінчується інтегральним трижильним екранованим кабелем (довжиною 8 метрів) з 4-полюсним роз'ємом. Гнучка металева труба захищає сигнальний кабель на всю його довжину.

Ємнісний датчик повітряного зазору «CGP-02». Ємнісний датчик повітряного зазору типу «CGP-02» компанії Iris Power LP, Канада, представлений на рис.1.17 [20].



Рис1.17 Ємнісний датчик «CGP-02»

Датчик виготовлений з друкованої плати та закріплений на отворі ядра статора за допомогою конкретної епоксидної смоли, що застосовується. Діапазон лінійного вимірювання датчиків становить 2–50 мм.

Особливості даного датчика:

- вихідні дані прямо пропорційні відстані повітряного зазору (полюсний профіль);
- простий в установці;
- не потрібно калібрування;
- стійкий до високої температури;
- не сприйнятливий до магнітних полів, пилу, нафти, EMI, RFI.

Ємнісний сенсор повітряного зазору «Air Gap Sensor v2» був розроблений та запатентований науковцями в Інституті Електродинаміки НАН України [21]. На рис.1.18 представлений макет сенсора.



Рис. 1.18 Ємнісний сенсор «Air Gap Sensor v2»

Сенсор містить високопотенціальний електрод, низькопотенціальний електрод та додатковий електрод з нульовим потенціалом. Ширина високопотенціального електрода рівна ширині низькопотенціального електрода. Додатковий електрод розміщений навколо високопотенціального та низькопотенціального електродів та поміж ними. Всі електроди розташовані в одній площині і закріплені на розточенні осердя статорі через діелектричну підкладку. Відносно поперечної осі високопотенційного електрода низькопотенційний електрод по довжині розташований симетрично, при цьому його довжина з кожного боку менша довжини високопотенційного електрода на величину, що є більшою або дорівнює максимальному зазору між розточенням осердя статора та полюсом ротора. Він має діапазон вимірювання від 2мм до 10мм, а також стійкий до магнітного впливу і краєвих ефектів.

Основні технічні характеристики ємнісних сенсорів вимірювання повітряного зазору наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Основні технічні характеристики ємнісних сенсорів

Технічні параметри та характеристики	4000	AGT-212	VM3.12	AGS	CS25	EQ 2431-A	CGP-02	Air Gap Sensor v2
Лінійний діапазон вимірювання, mm	5,1...50	2...12	2...20	5...25	5...30	5...25	3...15	2..10
Похибка вимірювання, %	1,25	5	0,3	1,5	2	1	3	1
Вимірювальний тип	Безконтактний	Безконтактний	Безконтактний	Безконтактний	Безконтактний	Безконтактний	Безконтактний	Безконтактний
Температурний діапазон, t°	0°...125°	-15°...+125°	0°...125°	-20°...+125°	-20°...+125°	-15°...+125°	-15°...+70°	-40°...+125°
Завадостійкість магнітного поля, Т	-	-	0...2	0...2	0...1,5	0...1,5	-	0...2
Живлення, V	23,25...24,75	24	24	24	20...28	24	24	5
Габаритні розміри датчика, mm L×H×W	284,1×2,3×78,2	263,5×3,5×38	220,5×3,3×33	232×3,3×32	250×3,2×50	220,5×2,1×32	135×1,7×32	220×1,5×30

1.4. Аналітичний огляд програмних засобів мультифізичного моделювання

Як зазначено в роботі [2] ємнісні сенсори повинні бути завадостійкими до впливу потужних електромагнітних полів, зберігати свої характеристики в широкому діапазоні робочих температур і необхідну точність для використання. Для дослідження та підтвердження цих характеристик доцільно буде використовувати засоби комп'ютерного моделювання. Комп'ютерні моделі простіші і зручніші аналітичних для проведення розрахунків, також, вони дозволяють виявити основні фактори, що визначають властивості досліджуваного об'єкта, зокрема, досліджувати відгук фізичної системи, що моделюється, на зміни її параметрів, початкових умов або впливів на цю систему.

Коли доводиться залучати кілька законів фундаментальної фізики в одній і тій же моделі, мова йде про мультифізичне моделювання. Процес мультифізичного моделювання проходить за певним алгоритмом, що включає в себе вибір відповідних декількох законів фізики, конструювання моделі, тобто завдання, креслення або імпорту геометрії об'єкта, введення параметрів, що описують властивості матеріалів моделі, граничних і початкових умов, сіткове розбиття моделі, отримання рішення, обробку отриманих даних, перевірку та затвердження. На етапі обробки даних можливе повернення на попередні стадії і розширення моделі шляхом додавання невикористаних раніше законів фізики [22]. Зазначена послідовність у вигляді схеми представлена на рис. 1.19.

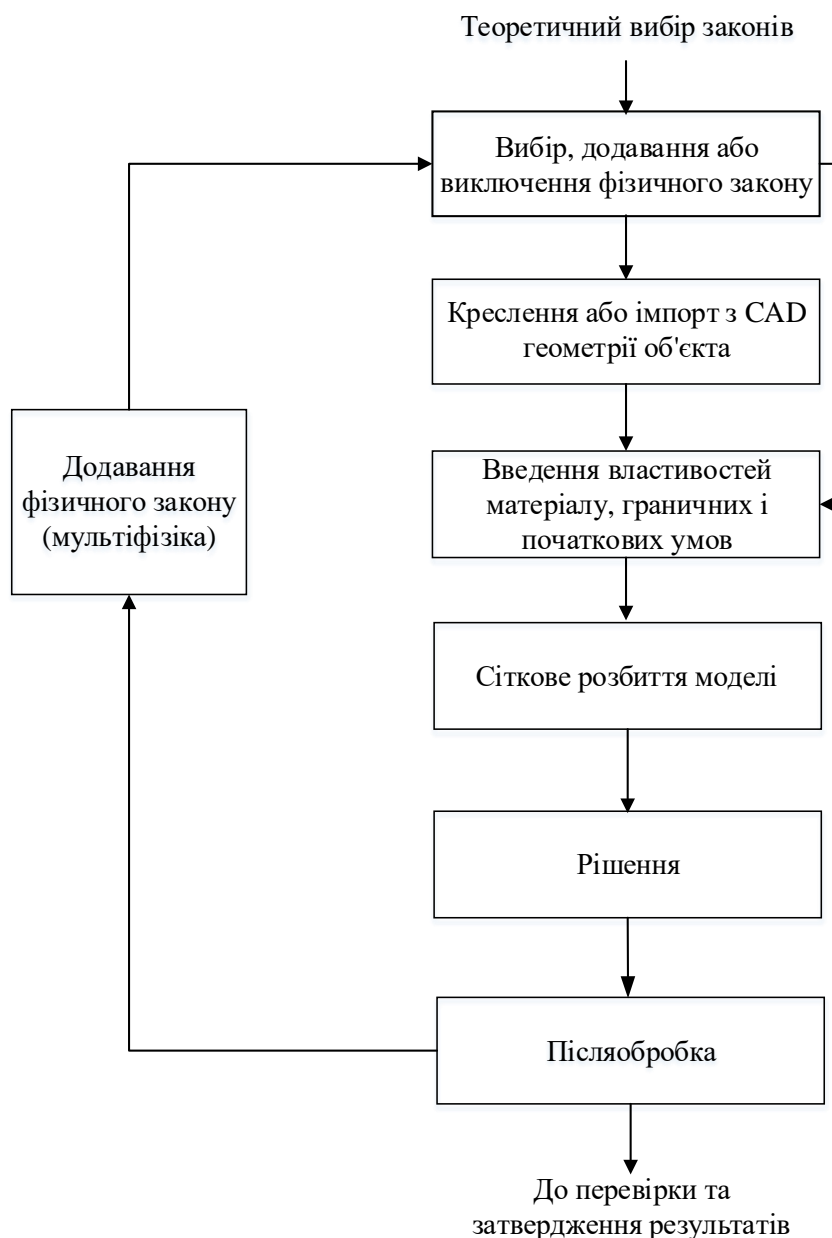


Рис. 1.19 Послідовність дій при мультифізичному комп'ютерному моделюванні

Одним з основних методів комп'ютерного мультифізичного моделювання є метод скінченних елементів (МСЕ), який заснований на локальній апроксимації рішення кусочно-поліноміальними функціями.

Найбільш поширеними універсальними системами МСЕ-аналізу в даний час є програмний комплекс ANSYS, COMSOL Multiphysics, ELCUT та Elmer, тому розглянемо їх детальніше.

Програмний комплекс ANSYS являє собою повний набір програмного забезпечення, яке охоплює весь спектр фізики, забезпечуючи доступ до практично

будь-якої області інженерного моделювання, тобто містить спеціальні багатодисциплінарні елементи, які дозволяють безпосередньо вирішувати пов'язані завдання, чого вимагає процес проектування.

Основним продуктом сімейства є пакет ANSYS / Multiphysics, що являє собою досить вичерпний програмний засіб аналізу для широкого кола інженерних дисциплін, який дозволяє проводити розрахункові дослідження не тільки в таких окремих областях знань, як міцність, поширення тепла, механіка рідин і газів або електромагнетизм, але і вирішувати пов'язані між собою завдання. На додаток до нього фірмою створені розрахункові коди у вигляді підмножини спеціалізованих, автономних програм або модулів, що розширюють зручність і функціональні можливості програмних засобів для аналізу проектних розробок [23].

Одним з таких є програмне забезпечення ANSYS Maxwell для моделювання електромагнітного поля, проектування і аналізу електричних машин, приводів, датчиків, трансформаторів і інших електромагнітних і електромеханічних пристроїв. За допомогою ANSYS Maxwell користувач може точно охарактеризувати нелінійні і перехідні процеси в електромеханічних компонентах і їх вплив на загальну схему приводу і систему управління. Завдяки використанню передових електромагнітних рішень ANSYS Maxwell, їх плавному підключенню до технології моделювання інтегральних схем і систем [24].

Основні недоліки: висока вартість, складність в освоєнні, відсутнє відображення формального запису граничних умов.

Пакет COMSOL Multiphysics дозволяє моделювати практично всі фізичні процеси, які описуються приватними диференціальними рівняннями. Програма містить різні вирішувачі, які допоможуть впоратися навіть з найскладнішими завданнями, а проста структура додатка забезпечує простоту і гнучкість використання [25]. Моделювання в цьому середовищі не вимагає глибокого знання математичної фізики і методу скінченних елементів. Це можливо завдяки вбудованим фізичним режимам, де коефіцієнти PDE задаються у вигляді величин зрозумілих фізичних властивостей і умов, таких, як теплопровідність, теплоємність, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, щільність і інших, в залежності від обраного фізичного розділу.

Перетворення цих величин в коефіцієнти математичних рівнянь відбувається автоматично. Взаємодія користувача з програмою можливо стандартним способом - через графічний інтерфейс користувача (англ. Graphical User Interface або скорочено GUI), або програмуванням за допомогою скриптів на мові COMSOL Script або мовою MATLAB, тобто всі можливості програмування, доступні в MATLAB, можуть бути використані і в COMSOL Multiphysics, наприклад при обробці результатів розрахунку.

Недоліками COMSOL Multiphysics є необхідність у високих обчислювальних потужностях.

ELCUT - це комплекс програм для інженерного моделювання електромагнітних, теплових і механічних завдань методом кінцевих елементів [26]. Основні плюси даного програмного комплексу: дружній призначений для користувача інтерфейс, простота опису моделей, широкі аналітичні можливості комплексу і високий ступінь автоматизації всіх операцій. ELCUT це повноцінний Windows додаток, який було розроблено спеціально для цієї платформи. Недоліки: відсутня можливість одночасного вирішення польових задач (наприклад, електромагнітної і теплової).

Elmer - проект розрахований на вирішення завдань з різних областей фізики: теплопровідності, гідродинаміки, механіки твердого тіла, акустики, електромагнетизму, квантової механіки; завдання описуються у вигляді легко читаються текстових файлів, є непоганий графічний інтерфейс, підтримує розпаралелювання по MPI, ліцензія GPL [27]. Недоліки: складно в освоєнні.

В таблиці 1.3 представлена порівняльні характеристики усіх вище перерахованих програмних засобів моделювання.

Таблиця 1.3

Порівняльна таблиця характеристик програмних засобів моделювання

Можливості ПЗ	ANSYS Multiphysics	COMSOL Multiphysics	ELCUT	Elmer
Різновид аналізу за законами фізики:				
Електростатичний	+	+	+	+
Електромагнітний	+	+	+	+
Термодинамічний	+	+	+	+
Механічний	+	+	+	+
Сумісний	+	+	-	-
Опис моделі:				
Диференціальні рівняння в часткових похідних	+	+	+	+
Система інтегрально-диференціальних рівнянь	+	+	+	+
Звичайні диференціальні рівняння	+	+	+	+
Алгебраїчні рівняння	+	+	+	+
Тип розрахунку:				
Статичний	+	+	+	+
Динамічний	+	+	+	+
Відображення розрахункових формул	-	+	-	-
Представлення геометричної моделі:				
Двомірна	+	+	+	+
Осьова симетрія	+	+	+	+
Тривимірна	+	+	Обмежена	+
Можливість експорту/імпорту даних до інших програмних пакетів:				
MATLAB Simulink	+	+	+	-
Solidworks	+	+	+	-
Особливості:				
Точність	Висока	Висока	Низька	Низька
Складність вивчення	Висока	Низька	Низька	Висока

Висновки до Розділу 1

За результатами аналізу особливостей вимірювання параметрів повітряного зазору та впливу цих параметрів на експлуатаційні характеристики ГГ визначено, що доцільним є використовувати динамічні методи вимірювання, які дозволяють в режимі реального часу отримати достовірні і повні дані про відхилення величини повітряного зазору від номінального значення. У цьому разі додатково можуть контролюватись: форма повітряного зазору, зміщення окремих полюсів ротора, деформація ободу ротора та розточення статора, зміщення ободу ротора(ексцентриситет), траєкторія руху центру ротора (годограф) та інші механічні параметри.

Проведений аналітичний огляд сучасних систем показав, що більшість з них або має недостатню кількість вимірювальних каналів, або для використання вимагають значну адаптацію до технічних характеристик ГГ, що експлуатуються та виготовляються в Україні. Це визначає необхідність реалізації спеціалізованих ІВС контролю повітряного зазору між ротором та статором до складу яких входять спеціалізовані комп'ютеризовані ІВК, що мають малі розміри та вартість, є завадостійкими до дії потужних магнітних полів об'єктів діагностування та забезпечують підвищення достовірності оцінювання технічного стану генераторів, за рахунок використання в їх структурі поєднання мікроелектронних технологій та вдосконалених математичних моделей й алгоритмів опрацювання контрольно-діагностичної інформації як в статичному так і в динамічному режимі роботи ГГ для проведення їх діагностування по фактичному технічному стану.

Також, на основі проведеного аналізу визначено оптимальний сенсор ємнісного типу, який за своїми характеристиками не поступається і є кращим в порівнянні з аналогами, що існують в світі. Для дослідження його метрологічних характеристик та впливу на його функції перетворення технологічних та експлуатаційних факторів, як було визначено, доцільно використовувати засоби комп'ютерного моделювання. Проведений аналіз існуючих програмних засобів моделювання показав, що COMSOL

Multiphysics має всі засоби та ресурси для повноцінного дослідження обраного сенсора.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ЄМНІСНОГО СЕНСОРА

В попередньому розділі було розглянуто ряд систем контролю та діагностики потужних генераторів, що містять в своїй структурі інформаційно-вимірювальні канали контролю ПЗ між ротом та статором. Запропоновані системи мають різні обмеження у застосуванні для вимірювання повітряного зазору, які визначаються необхідністю адаптації їх первинних вимірювальних перетворювачів (сенсорів) до конструктивних особливостей генератора. При цьому для досягнення оптимальної конструкції сенсору необхідно враховувати конструктивні особливості типів генераторів, що використовуються ПрАТ "Укргідроенерго".

Таким чином, виникає задача із отримання функції перетворення сенсору в залежності від його конструктивних характеристик (геометричних параметрів), встановлення впливу характеристик матеріалів (текстоліту FR4) з яких виготовляються сенсори та технологічних похибок, які мають місце виготовленні сенсору на його функцію перетворення.

2.1. Принцип вимірювання повітряного зазору ємнісними сенсорами

Основним елементом спеціалізованих ІВС діагностування ПГ є ІВК контролю ПЗ між ротом та статором. В таких ІВК в якості первинного чутливого елементу використовується ємнісний сенсор. Принцип дії сенсору базується на залежності електричної ємності від величини повітряного зазору.

Типову конструкцію ємнісного сенсора повітряного зазору, можна розглядати як плоско-паралельний конденсатор, електроди якого розташовані в паралельних площинах [2, 28], як показано на рис. 2.1, а.

Сенсори з конструкцією, що представлена на рис. 2.1, а, є найбільш простими для розрахунку технічних характеристик, так як засновані на фізичних концепціях простої моделі паралельного конденсатора. Принцип дії таких сенсорів полягає у вимірюванні електричної ємності між робочим потенціальним електродом, що розміщується на зубці статора, та полюсом ротора [29, 30]. Однак, їх суттєвим

недоліком є потреба у використанні складних вторинних перетворювачів, до яких входять спеціальні трансформатори з обмоткою, виконаних екранованим кабелем, та (за необхідності використання) спеціальних триаксіальних кабелів з подвійним екрануванням.

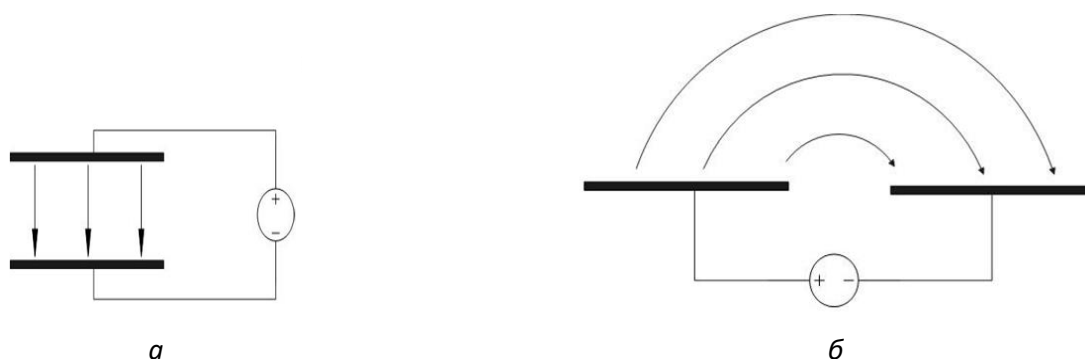


Рис.2.1 – Базові типи сенсорів:

a – ємнісний сенсор з плоско-паралельними електродами,
б – ємнісний сенсор з компланарними електродами.

Ємнісні сенсори з компланарним розташуванням електродів, що зображені на рис. 2.1, *б*, для розрахунку їх функцій перетворення потребують застосування чисельних методів, оскільки їх геометрія складніша, ніж у плоско-паралельного сенсора. Перевагою таких сенсорів є можливість використання поширених коаксіальних кабелів для з'єднання чутливих елементів сенсорів з вторинним вимірювальним перетворювачем.

Зазвичай такі сенсори складаються з двох або декількох електродів, на один з них подається змінна або постійна напруга (високопотенційний електрод), так що між пластинами може бути створено електричне поле, а решта електродів є детекторами (низькопотенційні електроди). Сенсор випромінює електростатичне поле, при наближенні об'єкта (полюса ротора) до поверхні електродів, це поле змінюється, сенсор детектує зміну поля і повертає зафіксований сигнал назад в блок управління (див. рис.2.2) [31].

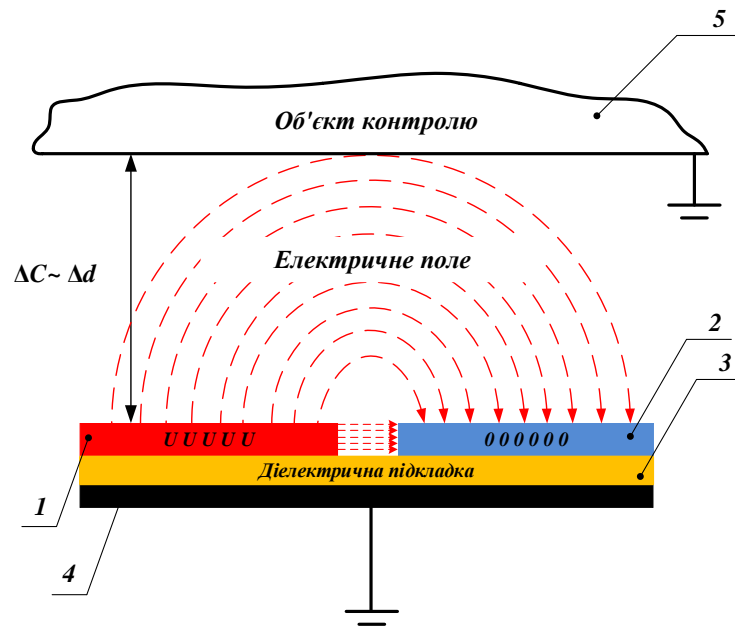


Рис.2.2 Принцип дії компланарних ємнісних сенсорів

Отже, принцип дії компланарних сенсорів можна описати як функціональну залежність електричної ємності від відстані до об'єкту контролю [2]:

$$C_x = f(d_x), \quad (2.1)$$

де C_x - ємність сенсора;

d_x - відстань між сенсором та заземленою поверхнею (полюсом ротора).

Недоліком такого сенсора є те, що він має звужений діапазон вимірювання через малу відстань між високопотенціальним та низькопотенціальним електродами, тому вводять додатковий електрод певної ширини, з забезпеченням мінімальних зазорів між електродами, поміж високопотенційним та низькопотенційним електродами, що дозволяє значно збільшити діапазон вимірювання.

Таким чином, ємнісні сенсори з компланарними електродами, за рахунок своєї структури (мають електроди ізольовані один від одного та від корпусу електричної машини і корпусу вторинного вимірювального перетворювача), дозволяють уникнути недоліки, пов'язані з використанням триаксiального кабелю та складної схеми вторинного вимірювального перетворювача, що є їх перевагою перед сенсорами розглянутими раніше.

2.2. Конструкція ємнісного сенсора для вимірювання ПЗ

Як зазначено в попередньому розділі, оптимальним типом ємнісного сенсору для вимірювання ПЗ є ємнісні сенсори з компланарними електродами.

Конструктивна схема ємнісного сенсора з компланарними паралельними електродами показана на рис. 2.3 [32].

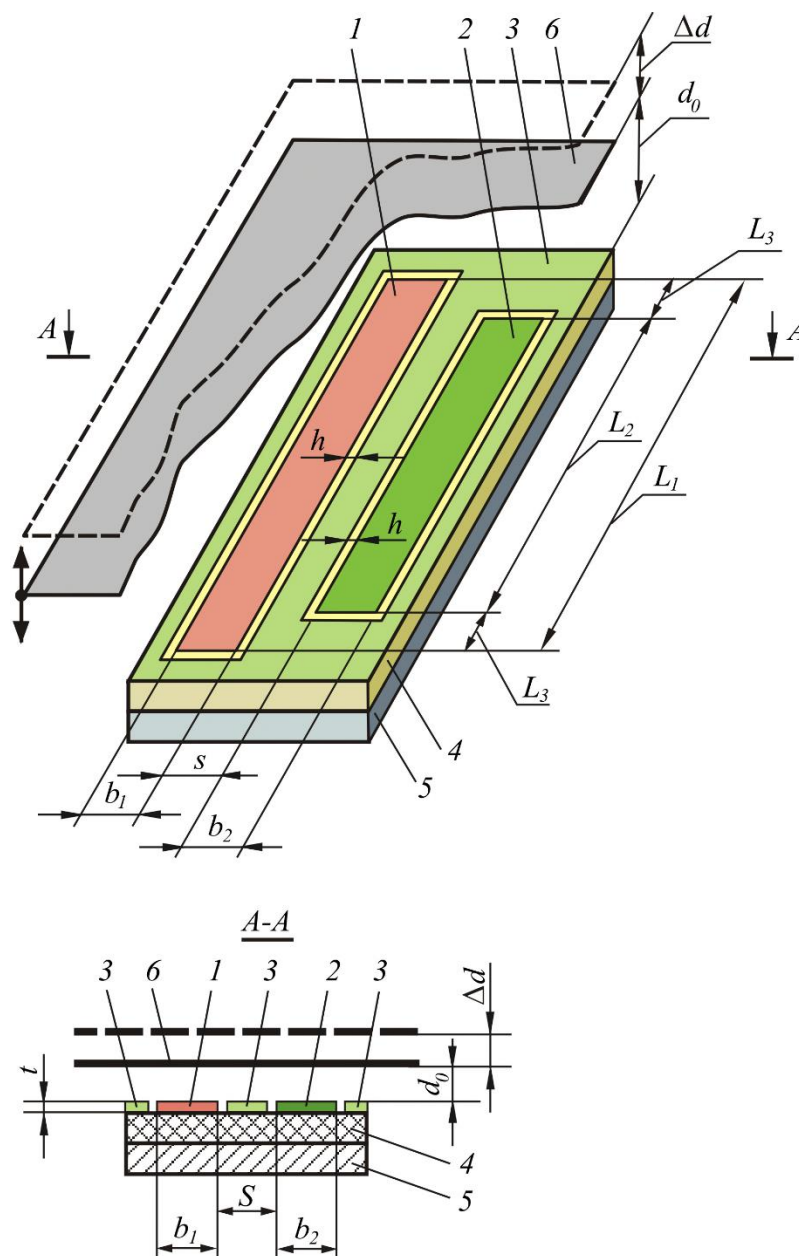


Рис.2.3 Конструктивна схема ємнісного сенсора зазору з двома компланарними паралельними електродами

Сенсор складається з таких основних частин: високопотенціального електрода 1 довжиною L_1 ; низькопотенціального електрода 2 довжиною L_2 ; низькопотенціального охоронного електрода 3; діелектричної підкладки 4; металевої підкладки 5, яка встановлюється на заземлену поверхню розточення осердя статора; довжина L_3 обирається з розрахунку $L_3 = \frac{(L_1 - L_2)}{2}$; b_1 – ширина електрода 1; b_2 – ширина електрода 2; s – відстань між електродами 1 та 2; d_0 – початкова відстань (початковий зазор) між загальною площиною електродів 1,2,3 і полюсом ротора 6; Δd_0 – зміна зазору d_0 ; h – ізоляційні проміжки між електродами 1,2,3; t – товщина тонкоплівкових металевих електродів 1,2,3.

Відповідно до [33, 2] сенсор має наступні геометричні розміри, що обумовленні конструктивними особливостями вітчизняних ГГ таких, як СКГ 538/160-70М: $b_1 = b_2 = b = 12$ мм – ширина електродів 1 та 2, $s = 2$ мм – відстань між ними, $L_1 = 200$ мм – довжина електрода - 1, $L_2 = 180$ мм – довжина електрода 2, загальна ширина не більше 30мм, загальна довжина не більше 220мм і загальна товщина не більше 1,5мм.

2.3. Визначення функції перетворення ємнісного сенсору ПЗ

Електрична ємність C_{12} між електродами 1 та 2 змінюється зі зміною відстані $d = d_0 \pm \Delta d$ між загальною площиною електродів 1,2, 3 та полюсом ротором 6. Функція перетворення ємності C_{12} від значення повітряного зазору d , при виконанні умови $L_3 \gg d_0$, $h \rightarrow 0$, $t \rightarrow 0$, $b_1 = b_2 = b$, визначається виразом [32]:

$$C_{12} = L_2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}, \quad (2.2)$$

де $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$, Ф/м - діелектрична проникність вакууму;

ϵ_r - відносна діелектрична проникність середовища (для повітря $\epsilon_r = 1,00056$).

В реальному випадку, проектування та виготовлення сенсорів необхідно виконувати виходячи із метрологічних, експлуатаційних, технологічних, ергономічних та ін. характеристик, що можуть впливати на використання сенсора.

Оскільки подальше використання розрахунків за формулою (2.2), яка отримана за допомогою конформного методу є не доцільними, тому кращим рішенням для отримання реальної функції перетворення є застосування комп'ютерних засобів моделювання. До таких засобів відноситься програмне середовище Comsol Multiphysics, в якому за допомогою методу скінченних елементів та інтегральних рівнянь проводяться чисельні розрахунки ємностей з високою точністю.

Як показав огляд літератури [33-37], дослідження технічних характеристик ємнісних сенсорів ПЗ в потужних гідрогенераторах, практично відсутні.

В той же час метрологічні характеристики ємнісних сенсорів суттєво залежать від матеріалів та технології які використовуються при їх виготовленні у відповідності до міжнародних стандартів IPC-2221B [38] та ANSI/IPC A-600H [39]. Такі сенсори по своїй суті є друкованими платами, що виготовлені із текстоліту, і тому можуть мати наступні обмеження та недоліки:

- 1) Ширина зазорів між електродами не може бути обрана менш (40-50) мкм, щоб уникнути можливості повного або часткового закорочення електродів частинками пилу, а також через ускладнення процесу очищення зазорів.
- 2) Важко досягти рівномірності зазорів по довжині внаслідок неточності виготовлення окремих електродів і неточності установки їх взаємного положення.
- 3) Можлива поява похибки через некомпланарність електродів.

Такі параметри як, товщина діелектричної підкладки, товщина електродів та міжелектродний зазор, можуть бути обрані з перелічених у таблиці 2.1 технічних характеристик матеріалів, які обираються у відповідності до стандартів [38,39].

Таблиця 2.1

Технічні характеристики матеріалів

Найменування	Характеристики
Стандартна товщина базового матеріалу плати, мм	0.5, 0.71, 1.0, 1.5, 2.0 $\pm 10\%$
Мінімальний міжелектродний зазор, мкм	100 170 200 250 300
Товщина фольги (покриття), мкм	18мкм, допуск ± 30 мкм 35 мкм, допуск ± 50 мкм 50 мкм, допуск ± 70 мкм 70 мкм, допуск ± 100 мкм 105 мкм, допуск ± 120 мкм

2.4. Комп'ютерна модель ємнісного сенсору

Дослідження моделі компланарного сенсора виконано з використанням числено-аналітичних методів за формулою (2.2) та засобами комп'ютерного моделювання Comsol Multiphysics, яке відбувалося в декілька етапів. На першому етапі, при моделюванні використовувалися електроди у формі прямокутників з нульовою товщиною. Передбачалося, що довжина прямокутних електродів набагато більша, ніж ширина, а проведені дослідження в роботі [40] підтвердили, що розподіл електричного уздовж низькопотенціального електрода можна вважати квазістаціонарним. Виходячи з цього, 3D-геометрія задачі може бути зведена до 2D моделі. У цьому разі модель сенсора складається із плоских геометричних фігур: високопотенціального та низькопотенціального електрода ($b_1 = b_2 = b = 12\text{мм}$), охоронного електрода ($s = 2\text{мм}$) та металевої заземленої підкладка, що імітує поверхню полюса ротора, для реалізації яких використовується вузол Geometry. Для конкретної моделі були використані такі матеріали як повітря, для областей між електродами та заземленою поверхнею полюса ротора і мідь, як основний матеріал

електродів. Властивості матеріалів для усіх фізичних областей моделі задаються в модулі Materials.

Електричні властивості створених елементів моделі задається у вузлі Electrostatics. Так як функція перетворення зводиться до визначення напруженості електричного поля E і щільності електричного потоку D , то для статичного електричного поля повинні виконуватися дві умови. Перша умова - потік електричного зміщення через замкнену поверхню дорівнює заряду, укладеним всередині неї (закон Гаусса в диференціальній формі):

$$\nabla \cdot D = \rho_V, \quad (2.3)$$

де ρ_V - об'ємна щільність електричних зарядів.

Друга умова - закон Ампера для статичного електричного поля в диференціальній формі:

$$\nabla \times E = 0. \quad (2.4)$$

Електричне зміщення і напруженість електричного поля пов'язані між собою співвідношенням:

$$D = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \quad (2.5)$$

де ε_0 та ε_r - абсолютна і відносна діелектрична проникність речовини.

Дана програма розглядає тільки лінійні залежності між напруженістю і зміщенням.

Для спрощення обчислення поля і задоволення двох вищевказаних умов (2.4, 2.5), програма використовує співвідношення:

$$E = -\nabla \cdot V, \quad (2.6)$$

де V - різниця потенціалів.

У цьому випадку умова (2.4) виконується завжди, так як $\nabla \times \nabla \cdot V \equiv 0$, а умова (2.3) - закон Гаусса - приводить до рівняння:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \cdot \nabla \cdot V) = \rho_V \quad (2.7)$$

Для подальших розрахунків, у вузлі Mesh дерева моделі виконується триангуляція обраних областей для побудова скінченно-елементної сітки. На рис. 2.4

показано реалізовану імітаційну CAD-модель сенсора із сіткою, яка містить 4155 елементів.

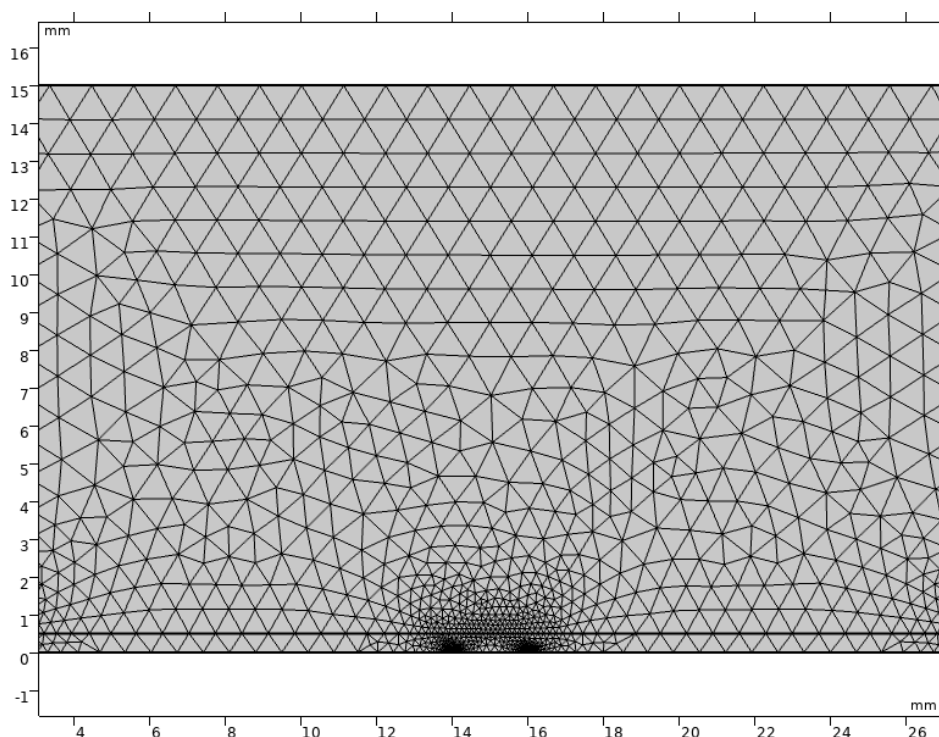


Рис. 2.4 – Скінченно-елементна сітка моделі сенсору

Далі для проведення попередніх досліджень розподілення потенціалів зарядів в електричному полі сенсору використовується вузол Study. Після виконання обчислень моделі у вузлі Results створюється група типу 2D Plot Group – Electric Potential з відображеннями:

- Contour 1, що відображає графік розподілу електричного потенціалу сенсора, що приведено на рис. 2.5;
- Streamline 1, що відображає контурний графік еквіпотенціальних ліній, який приведено на рис. 2.6.

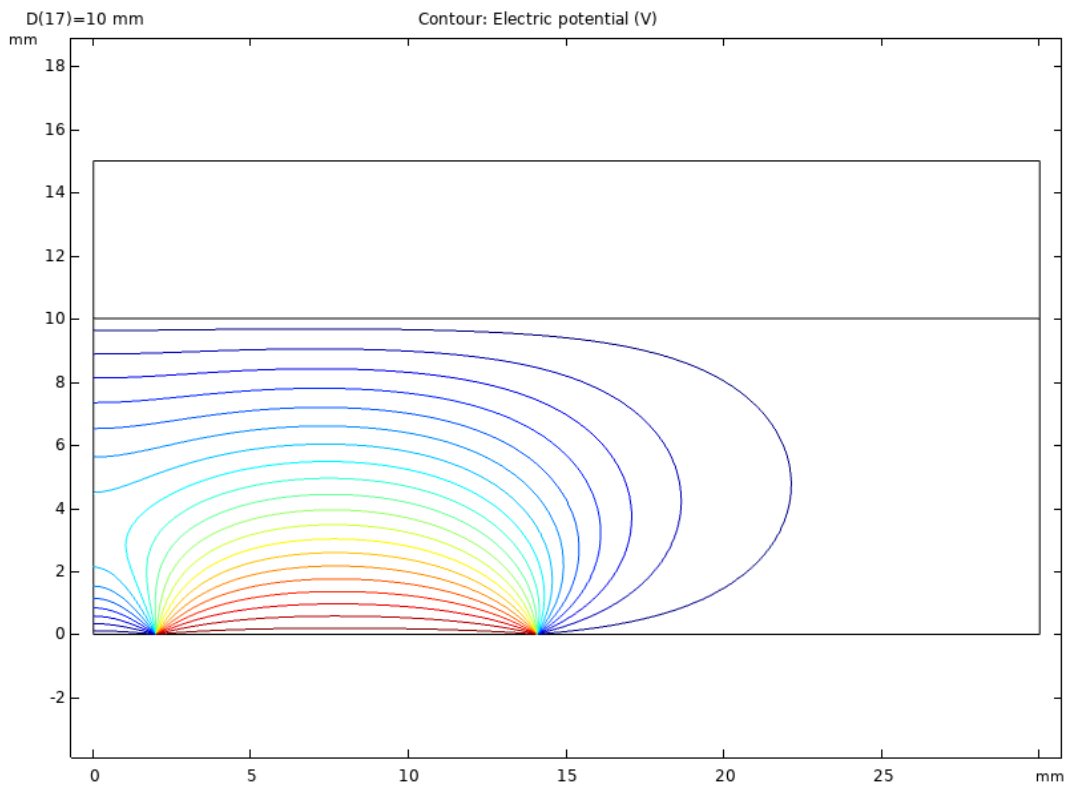


Рис. 2.5 – Графік напруженості електричного поля

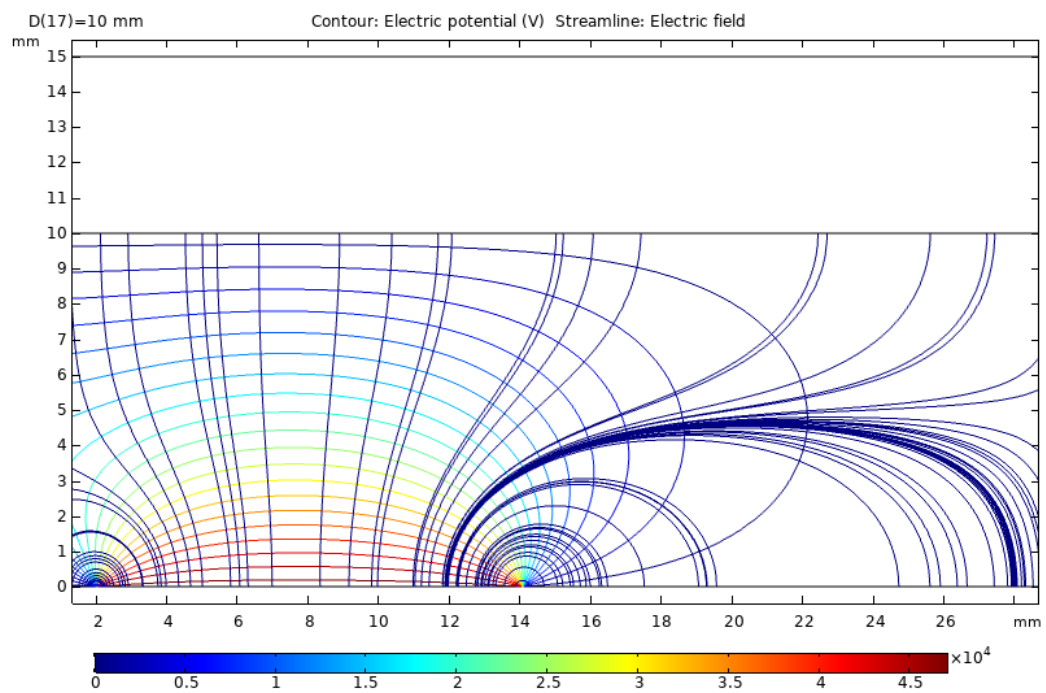


Рис. 2.6 – Контурний графік еквіпотенціальних ліній

Результати розрахованих комп'ютерним способом (Comsol Multiphysics) значень ємності в залежності від відстані до заземленої поверхні знаходяться у розділі Results – Derived Values і представлені в таблиці 2.2.

Для перевірки узгодженості отриманих результатів створеної моделі С (в Comsol) та результатів розрахованих аналітичним способом С (розрах.), товщина електродів та міжелектродний зазор приймаються нескінченно малими.

Таблиця 2.2

Розраховані значення ємності

D, мм	C (розрах), пФ	C (Comsol), пФ	δ , %
2	0.02	0.02	0.15
2.5	0.04	0.04	0.13
3	0.07	0.07	0.11
3.5	0.09	0.09	0.10
4	0.12	0.12	0.09
4.5	0.14	0.14	0.08
5	0.17	0.17	0.08
5.5	0.19	0.20	0.07
6	0.22	0.22	0.10
6.5	0.24	0.24	0.13
7	0.26	0.26	0.18
7.5	0.28	0.29	0.24
8	0.30	0.31	0.34
8.5	0.32	0.33	0.45
9	0.34	0.34	0.59
9.5	0.36	0.36	0.76
10	0.37	0.38	0.96

Відносне відхилення результатів між розрахунками аналітичними та у програмі COMSOL Multiphysics не перевищує 1%, що свідчить про адекватність моделювання сенсора.

2.5. Дослідження впливу технологічних факторів на функцію перетворення ємнісного сенсору

2.5.1. Дослідження впливу міжелектродного зазору на функцію перетворення ємнісного сенсору

Для того щоб визначити оптимальний розмір міжелектродного зазору ємнісного сенсору в середовищі Comsol Multyphysics була створена відносно ідеалізована модель, схема якої представлена рис.2.7.

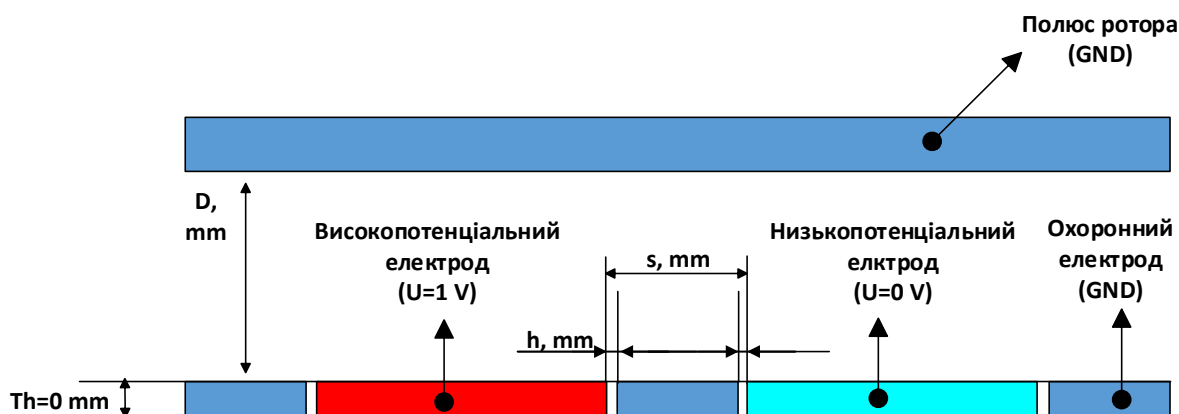


Рис 2.7 Схема моделі ємнісного сенсору з врахуванням міжелектродного зазору h .

Ідеалізована модель сенсору складається з високопотенціального електрода, низькопотенціального та охоронного електродів, що були прийняті як лінії з нульовою товщиною $Th=0\text{ мм}$. На високопотенціальний – випромінюючий – електрод подається напруга $U=1\text{ В}$, на низькопотенціальний – приймаючий – електрод подається напруга $U=0\text{ В}$, охоронний електрод та полюс ротора заземлені.

В зазначеній моделі змінювали лише міжелектродний зазор h в діапазоні 0,1, 0,17, 0,2, 0,25, 0,3 мм (див. табл. 2.1) у відповідності до міжнародного стандарту ANSI/IPC A-600H [39].

Результати дослідження представлені в таблиці 2.3 та на рис. 2.8.

Таблиця 2.3

Результати дослідження

D, мм	h=0.1мм	h=0.17мм	h=0.2мм	h=0.25мм	h=0.30мм
	C (Comsol), пФ				
1	2	3	4	5	6
2	0.0263	0.0295	0.0310	0.0336	0.0365
2.5	0.0489	0.0537	0.0559	0.0597	0.0640
3	0.0746	0.0808	0.0837	0.0886	0.0939
3.5	0.1018	0.1092	0.1126	0.1185	0.1247
4	0.1292	0.1377	0.1415	0.1482	0.1553
4.5	0.1565	0.1658	0.1701	0.1774	0.1852
5	0.1831	0.1932	0.1978	0.2057	0.2140
5.5	0.2089	0.2196	0.2245	0.2329	0.2417
6	0.2337	0.2451	0.2501	0.2590	0.2682
6.5	0.2575	0.2694	0.2747	0.2839	0.2935
7	0.2803	0.2926	0.2981	0.3077	0.3176
7.5	0.3021	0.3148	0.3205	0.3303	0.3406
8	0.3228	0.3360	0.3418	0.3518	0.3624
8.5	0.3426	0.3561	0.3620	0.3723	0.3831
9	0.3615	0.3753	0.3813	0.3918	0.4027
9.5	0.3795	0.3935	0.3997	0.4104	0.4215
10	0.3966	0.4109	0.4172	0.4280	0.4393

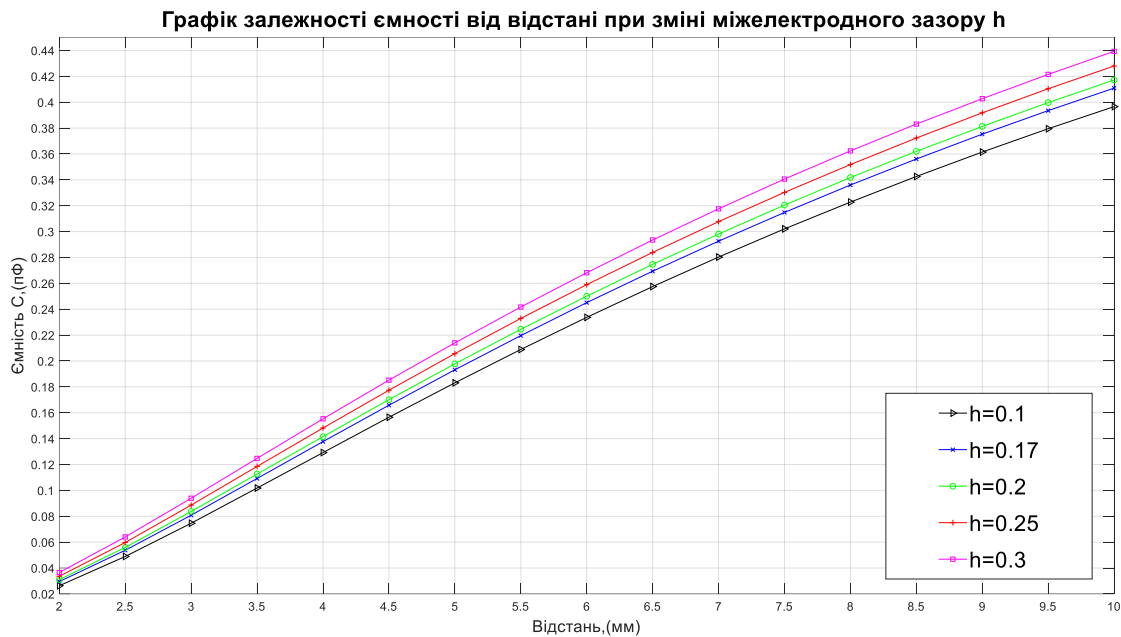


Рис. 2.8 Графік залежності ємності від відстані при зміні міжелектродного зазору h в діапазоні 0.1, 0.17, 0.2, 0.25, 0.3 мм

Як видно з результатів дослідження, що представлені на рис.2.8 та в таблиці 2.3, міжелектродний зазор має прямий вплив на функцію перетворення, тобто зі збільшенням міжелектродного зазору збільшується значення ємності. Це пов'язано з впливом краєвого ефекту, який необхідно буде враховувати при обробці вихідних даних з сенсора.

Виходячи з отриманих результатів та проаналізувавши ринок виробництва друкованих плат [41-43], можна зробити висновок, що оптимальний розмір міжелектродного зазору для ємнісного сенсору становить 0.1мм.

2.5.2. Дослідження впливу товщини електродів на функцію перетворення ємнісного сенсору

По аналогії з пп. 2.4.1, для визначення оптимальної товщини електродів в середовищі Comsol Multyphysics була створена відносно ідеалізована модель ємнісного сенсору, схема якого представлена на рис.2.9.

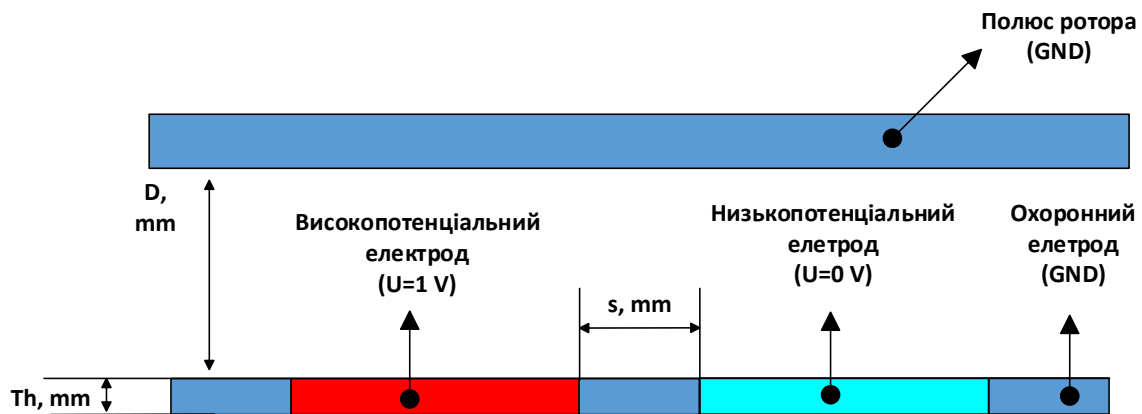


Рис.2.9 Схема емнісного сенсора з врахуванням товщини електродів Th .

Відмінність з попередньою моделлю (рис.2.7) полягає в тому, що за змінну величину приймається товщина електродів (фольги) Th , яку змінюють в діапазоні 0.018, 0.035, 0.05, 0.07, 0.105мм (див. табл. 2.1), а значення відстані міжелектродного зазору приймається нескінченно малим $h \rightarrow 0$.

Результати дослідження представлені в таблиці 2.4 та на рис. 2.10.

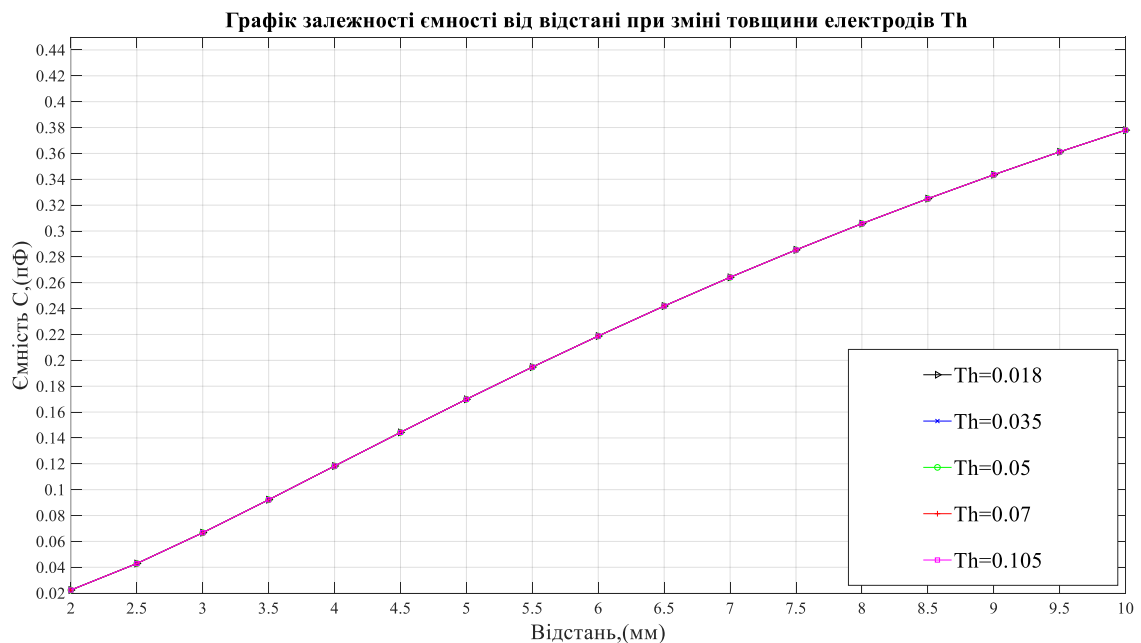


Рис. 2.10 Графік залежності ємності від відстані при зміні товщини електродів Th в діапазоні 0.018, 0.035, 0.05, 0.07, 0.105мм

Таблиця 2.4

Результати дослідження

D, мм	Th=0.018мм	Th=0.035мм	Th=0.05мм	Th=0.07мм	Th=0.105мм
	C (Comsol), пФ				
2	0.0224	0.0224	0.0224	0.0224	0.0224
2.5	0.0429	0.0429	0.0429	0.0429	0.0429
3	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667
3.5	0.0922	0.0922	0.0922	0.0922	0.0922
4	0.1183	0.1183	0.1183	0.1183	0.1183
4.5	0.1443	0.1443	0.1443	0.1443	0.1443
5	0.1699	0.1699	0.1699	0.1699	0.1699
5.5	0.1948	0.1948	0.1948	0.1948	0.1948
6	0.2188	0.2188	0.2188	0.2188	0.2188
6.5	0.2420	0.2420	0.2420	0.2420	0.2420
7	0.2642	0.2642	0.2642	0.2642	0.2642
7.5	0.2854	0.2854	0.2854	0.2854	0.2854
8	0.3057	0.3057	0.3057	0.3057	0.3057
8.5	0.3250	0.3250	0.3250	0.3250	0.3250
9	0.3435	0.3435	0.3435	0.3435	0.3435
9.5	0.3612	0.3612	0.3612	0.3612	0.3612
10	0.3780	0.3780	0.3780	0.3780	0.3780

Як видно з рис. 2.10, графіки залежності ємності від відстані при зміні товщини електродів практично зливаються в одну лінію. Така поведінка функції свідчить про те, що товщина електродів майже не впливає на функцію перетворення.

Звідси випливає, що вибір оптимальної товщини електродів базується на загальній товщині сенсора та товщині діелектричної підкладки.

2.5.3. Дослідження впливу товщини діелектричної підкладки на функцію перетворення ємнісного сенсору

В міжнародному стандарті прийомки друкованих плат ANSI/IPC A-600H [39] визначено, що стандартними товщинами друкованих плат, з врахуванням товщини діелектричної підкладки (FR4) та товщини фольги (електродів), є 0.5, 0.71, 1.0, 1.5, 2.0мм.

В той же час, авторами в роботах [33, 2] зазначено, що оптимальна загальна товщина сенсора складає приблизно 1.5мм, так як при меншій товщині імовірно виникнення суттєвої похибки від кривизни поверхні розточення статора [44], а при більшій – зменшується інформативний діапазон вимірювання ПЗ.

Враховуючи вище зазначене, стандартний діапазон товщин фольги (електродів) та конструкцію сенсора (див. п.2.2), можна розрахувати діапазон можливих товщин діелектричної підкладки за формулою:

$$Th_Diel = Th_sens - (Th_1 + Th_2), \quad (2.8)$$

де $Th_sens = 1.5\text{мм}$ - загальна товщина сенсору;

Th_1 - товщина електродів;

Th_2 - товщина металевої підкладки сенсору (див. п.2.2).

Таким чином, діапазон можливих товщин діелектричної підкладки Th_Diel складає 1.29, 1.36, 1.4, 1.43, 1.464мм.

Аналогічно до пп.2.4.1 та пп.2.4.2 в середовищі Comsol Multyphysics була створена відносно ідеалізована модель ємнісного сенсору за схемою, що представлена на рис.2.11.

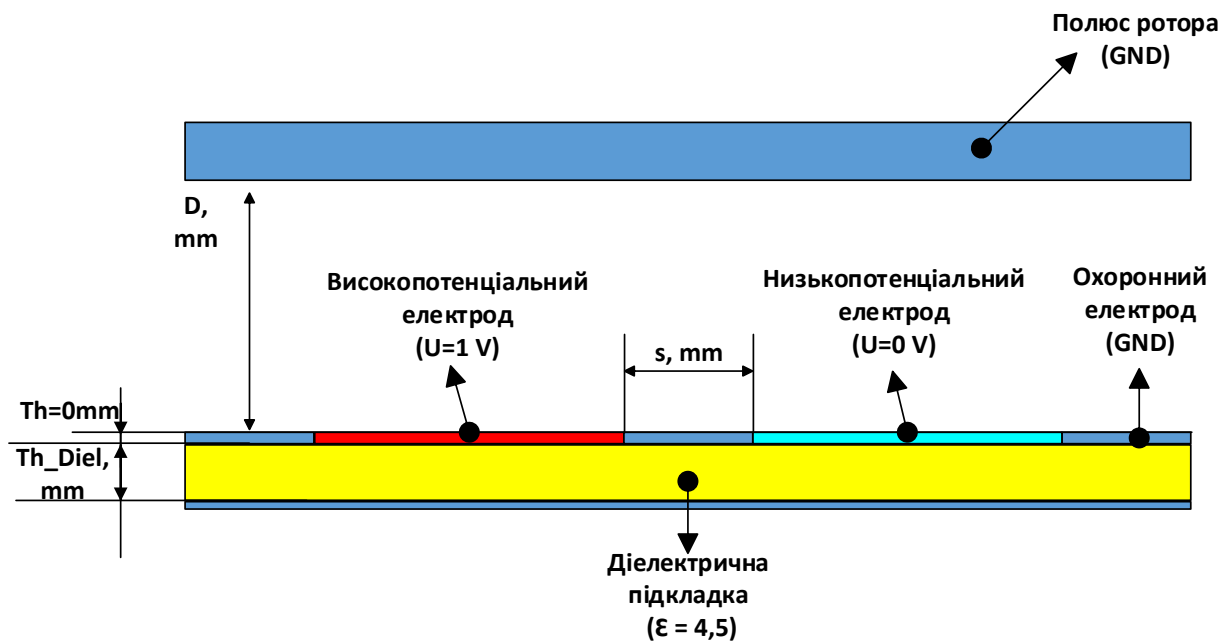


Рис.2.11 Схема ємнісного сенсора з врахуванням товщини діелектричної підкладки Th_Diel та його діелектричної проникності

В даній моделі змінюється лише товщина діелектричної підкладки Th_Diel в межах діапазону розрахованого за формулою (2.8), а товщини електродів та металеві підкладки прийняті за лінії нульової товщини. Результати дослідження представлені в таблиці 2.5 та на рис. 2.12.

Таблиця 2.5

Результати дослідження

D, мм	Th_Diel= 1.29мм	Th_Diel= 1.36мм	Th_Diel= 1.4мм	Th_Diel= 1.43мм	Th_Diel = 1.464мм
	C (Comsol), пФ				
1	2	3	4	5	6
2	0.0400	0.0450	0.0482	0.0508	0.0539
2.5	0.0604	0.0655	0.0687	0.0712	0.0743
3	0.0842	0.0893	0.0925	0.0950	0.0981
3.5	0.1097	0.1148	0.1180	0.1205	0.1236
4	0.1358	0.1408	0.1440	0.1466	0.1497
4.5	0.1618	0.1668	0.1700	0.1726	0.1757

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4	5	6
5	0.1874	0.1924	0.1956	0.1982	0.2012
5.5	0.2122	0.2173	0.2205	0.2230	0.2261
6	0.2363	0.2413	0.2445	0.2471	0.2501
6.5	0.2594	0.2644	0.2676	0.2702	0.2733
7	0.2816	0.2866	0.2898	0.2924	0.2955
7.5	0.3028	0.3078	0.3111	0.3136	0.3167
8	0.3231	0.3281	0.3313	0.3339	0.3370
8.5	0.3425	0.3475	0.3507	0.3533	0.3563
9	0.3609	0.3660	0.3692	0.3717	0.3748
9.5	0.3786	0.3836	0.3868	0.3894	0.3924
10	0.3954	0.4004	0.4036	0.4062	0.4093

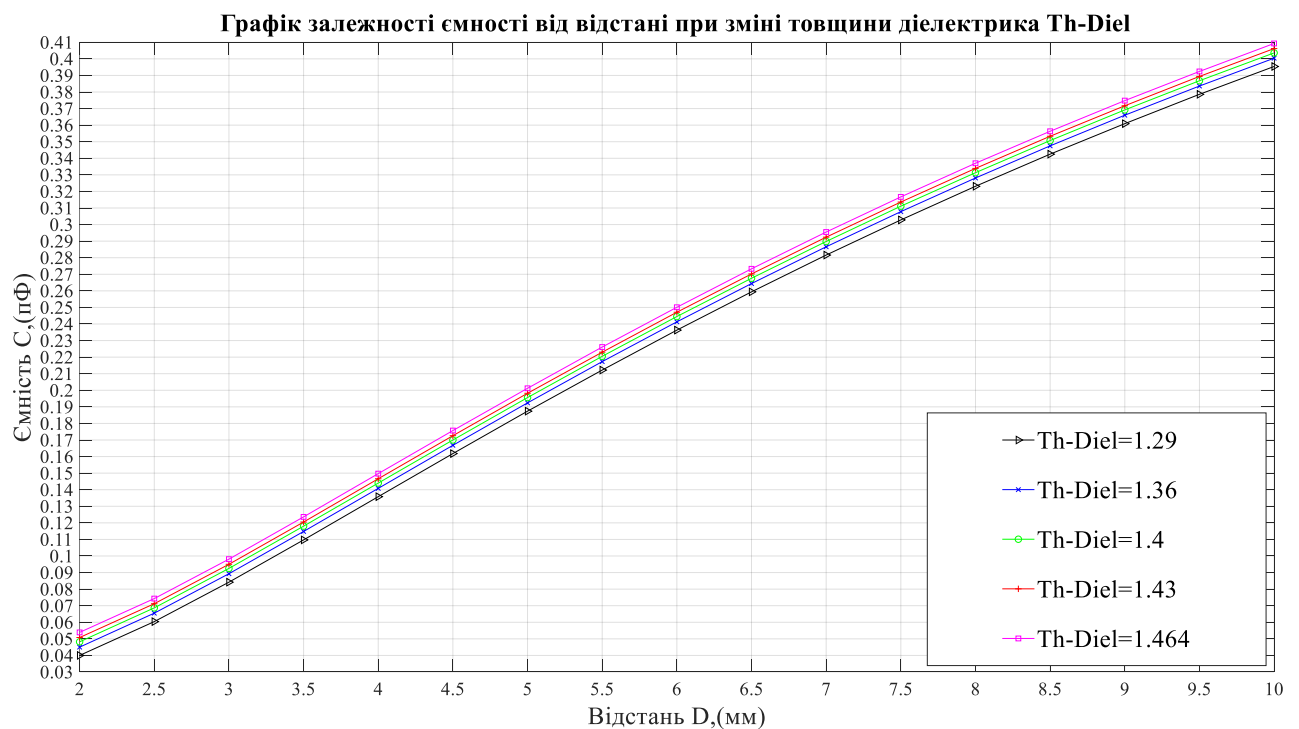


Рис.2.12 Графік залежності ємності від відстані при зміні товщини діелектричної підкладки Th_Diel в діапазоні 1.29, 1.36, 1.4, 1.43, 1.464 мм

Як показали результати проведених досліджень, що представлені в табл. 2.5 зі збільшенням товщини діелектричної підкладки збільшується ємність сенсору. Залежність збільшення величини ємності від товщини діелектричної підкладки носить адитивний характер.

Обрана товщина діелектричної підкладки (FR4) становить 1.43мм, а товщина фольги (електродів) - 0.035мм відповідно до стандарту IPC-4101C [45] для товщин від 1.0мм до 3.0мм.

2.6. Порівняння результатів дослідження моделі сенсору з результатами аналітичних розрахунків

Важливим етапом досліджень є порівняння між собою отриманих теоретичних і модельних результатів, тобто перевірка узгодженості теоретичних результатів з модельними (табл.2.6). Для перевірки узгодженості результатів розрахуємо відносну похибку ΔC за формулою:

$$\Delta C = (C_{Cmsol} - C_{розрах}) \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

Результати отриманих розрахунків абсолютної похибки приведені в табл.2.7. та на рис. 2.14. Середнє значення похибки становить $\Delta \bar{C} = 4,97\%$

Таблиця 2.7

Результати розрахунків

D, мм	C (розрах), пФ	C (Cmsol),пФ	$\Delta \bar{C}$, %
1	2	3	4
2	0.0224	0.0618	3,94
2.5	0.0429	0.0843	4,14
3	0.0667	0.1100	4,33
3.5	0.0921	0.1372	4,51
4	0.1182	0.1646	4,64
4.5	0.1442	0.1919	4,77
5	0.1698	0.2185	4,87
5.5	0.1946	0.2442	4,96
6	0.2186	0.2691	5,05
6.5	0.2416	0.2929	5,13

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4
7	0.2637	0.3157	5,2
7.5	0.2847	0.3374	5,27
8	0.3046	0.3582	5,36
8.5	0.3236	0.3780	5,44
9	0.3415	0.3968	5,53
9.5	0.3584	0.4148	5,64
10	0.3744	0.4320	5,76

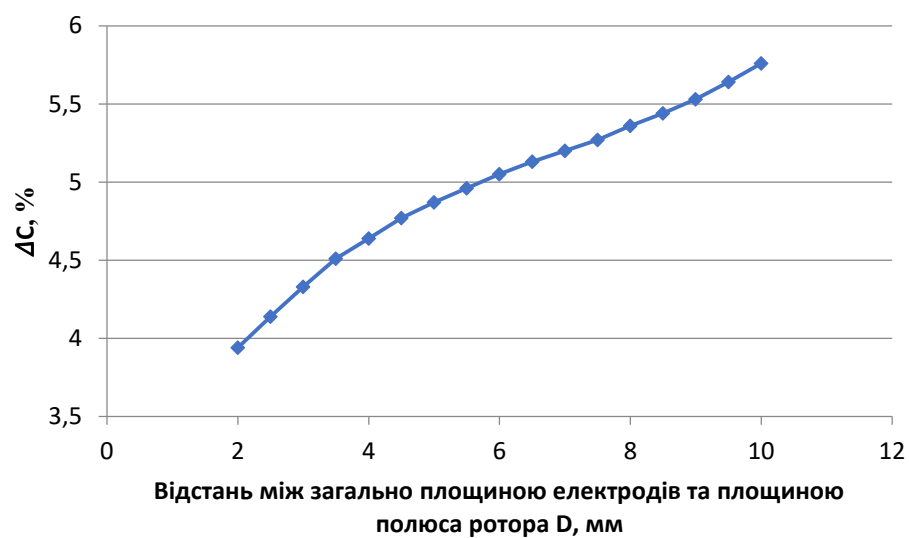


Рис.2.14 Графік абсолютної похибки

Отже, абсолютна похибка обумовлена розбіжністю теоретичних і модельних результатів становить 4,97%. Отримане значення є незначним і свідчить про те, що в створеній моделі в середовищі мультифізичного моделювання Comsol Multiphysics на відміну від аналітичного розрахунку відбувається більш точне врахування впливу "крайових ефектів" та інших факторів, що призводять до появи додаткових похибок, що були досліджені окремо.

Висновки до Розділу 2

1. В ході проведення досліджень було виявлено наступні переваги використання програмного забезпечення Comsol Multiphysics для дослідження характеристик ємнісних сенсорів в порівнянні з аналітичними методами:

- можливість зменшення часу дослідження метрологічних характеристик функцій перетворення ємнісних сенсорів;
- реалізація автоматичних розрахунків для визначення картини розподілу еквіпотенціальних ліній електричного поля при зміні відстані між поверхнею робочого електрода та заземленою поверхнею, що імітує циліндричну поверхню вала гідрогенератору.

2. Використання методу скінченних елементів та створеної скінченно-елементної моделі конструкції ємнісного сенсора повітряного зазору дозволило визначити функцію перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в залежності від значення повітряного зазору між площиною електродів сенсора та заземленою плоскою металевою поверхнею ротора полюса засобами комп'ютерного моделювання в середовищі Comsol Multiphysics.

3. Отримані результати підтверджують можливість застосування ємнісного сенсора з запропонованою системою електродів для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М в діапазоні 6 ± 4 мм.

4. При проведенні досліджень впливу конструктивних характеристик (геометричних параметрів) матеріалів (текстоліту FR4) з яких виготовляються сенсори та технологічних похибок, які мають місце виготовленні сенсору на його функцію перетворення було отримано, що:

- міжелектродний зазор має прямий вплив на функцію перетворення, тобто зі збільшенням міжелектродного зазору збільшується значення ємності.
- зміна товщини електродів практично майже не впливає на функцію перетворення.
- збільшенням товщини діелектричної підкладки збільшується ємність сенсору.

РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ ПОТУЖНИХ ГЕНЕРАТОРІВ

В попередньому розділі було показано, що найбільш прийнятним з точки зору технічної реалізації первинного вимірювального перетворювача (сенсору) інформаційно-вимірювального каналу системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів є ємнісний сенсор з компланарним розміщенням чутливих елементів (електродів). Для визначення меж застосування сенсору було розроблено конструкцію сенсору для вимірювання повітряного зазору між ротором та статором потужних гідрогенераторів, розраховано його функцію перетворення та досліджено вплив технологічних факторів на неї, що дозволило розрахувати сімейство функцій перетворення сенсору для вибору його оптимальної конструкції та технології виготовлення в залежності від конструктивних особливостей генератора й допустимої похибки визначення величини повітряного зазору.

Однак у при практичному використанні, а особливо в робочих режимах генератору системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів, для більш достовірного визначення значення повітряного зазору, доповнюється додатковими компонентами. Тому третій розділ присвячено розробленню загальної структурної схеми системи та її основних компонентів.

3.1. Визначення вимог до системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів

На основі аналітичного огляду проведеного в розділі 1, конструктивних особливостей та експлуатаційних умов ГГ типу СГК 538/160-70М [46], а також враховуючи вимоги міжнародного стандарту ISO 20816-1:2016 [47], можна визначити наступні основні вимоги до системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів:

- 1) Можливість контролю параметрів ПЗ в діапазоні 6 ± 4 мм;

- 2) Загальна похибка системи вимірювання повітряного зазору повинна не перевищувати 5%.
- 3) Додаткові компоненти повинні мати діапазон вимірюваних величин та точність на рівні аналогів;
- 4) Можливість проведення первинних вимірювань та підготовки даних в доступній для оператора формі;
- 5) Не бути складною в проектуванні та експлуатації.

3.2. Структурна схема системи

Розроблена ІВС призначена для контролю параметрів повітряного зазору гідрогенераторів. Система може бути використана в будь-якому енергетичному обладнанні, що має обертові вузли, а також в дослідницьких та навчальних лабораторіях, де використовуються системи контролю зміни параметрів повітряного зазору між конструктивними елементами вузлів будь-якого обладнання.

Система має модульну архітектуру побудови, що дозволяє забезпечити гнучкість, взаємозамінність та можливості конфігурування під різні конструктивні особливості та експлуатаційні умови роботи ГГ. До складу системи входять вимірювальні модулі, блок збору даних, блок живлення та робочої станції. Кожний модуль містить 3 ІВК: канал вимірювання повітряного зазору, канал вимірювання магнітного поля та каналу вимірювання температури. Останні два канали призначені використовуватися для врахування впливу робочого середовища на результат вимірювання повітряного зазору. Кількість модулів обирається в залежності від геометричних параметрів генераторів і варіюється від 2 до 16. Інформація щодо стану та параметрів ПЗ з блоку збору даних надходить до робочої станції. Робоча станція має необхідні комплекти прикладних програм, які забезпечують обробку та аналіз отриманих даних, щодо фактичного стану ГГ. Для зручності роботи користувача можна використовувати будь-який інтерфейс Human Machine Interface.

Структурна схема спеціалізованої ІВС контролю ПЗ зображена на рис.3.1.

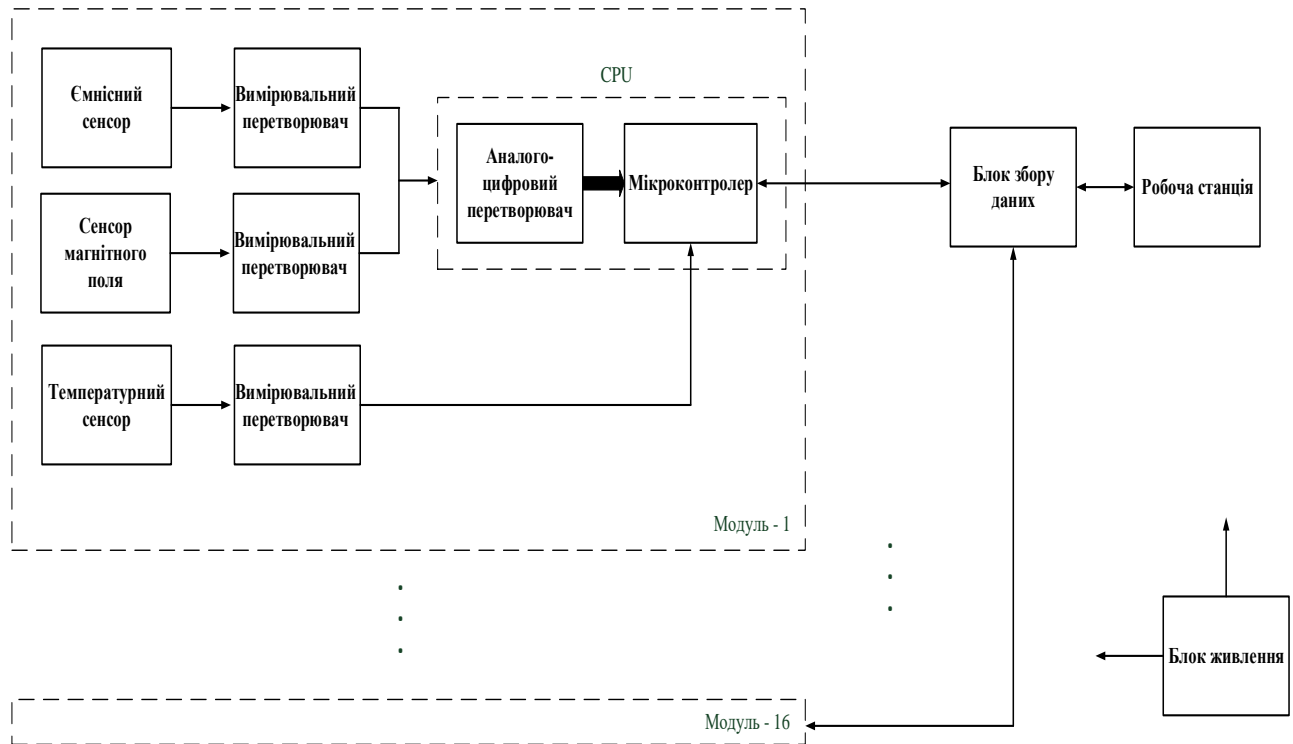


Рис.3.1 Структурна схема спеціалізованої ІВС контролю ПЗ

Основний принцип роботи системи полягає в вимірюванні відстані d_x між поверхнею ємнісного сенсора та полюсом ротора. У цьому разі зміна відстані d_x впливає на зміну електричної ємності C_x . Для вимірювання електричної ємності C_x використовується датчик повітряного зазору. Дані з датчика поступають на вторинний вимірювальний перетворювач, з якого аналоговий сигнал у вигляді напруги поступає на вхід АЦП, який інтегрований в МК. З МК дані в цифровій формі через блок збору даних передаються до робочої станції. Для компенсації похибки від дії магнітного поля та температури на результат визначення C_x використовується відповідно сенсор магнітного поля та температури. Данні з сенсорів знімаються неперервно, та використовуються в цифровій формі для реалізації алгоритму адаптивної цифрової компенсації впливу робочого середовища в якому знаходиться ємнісний сенсор повітряного зазору.

Для синхронізації роботи системи контролю та діагностики повітряного зазору з іншими системами технічного діагностування потужних генераторів використовується штатний сенсор мітки валу.

3.3. Канал вимірювання температури

Враховуючи те, що система призначена для експлуатації в температурному діапазоні від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$, тому в якості датчика температури був обраний цифровий сенсор LM71, в якому вбудований 14-бітний сигма-дельта АЦП [48].

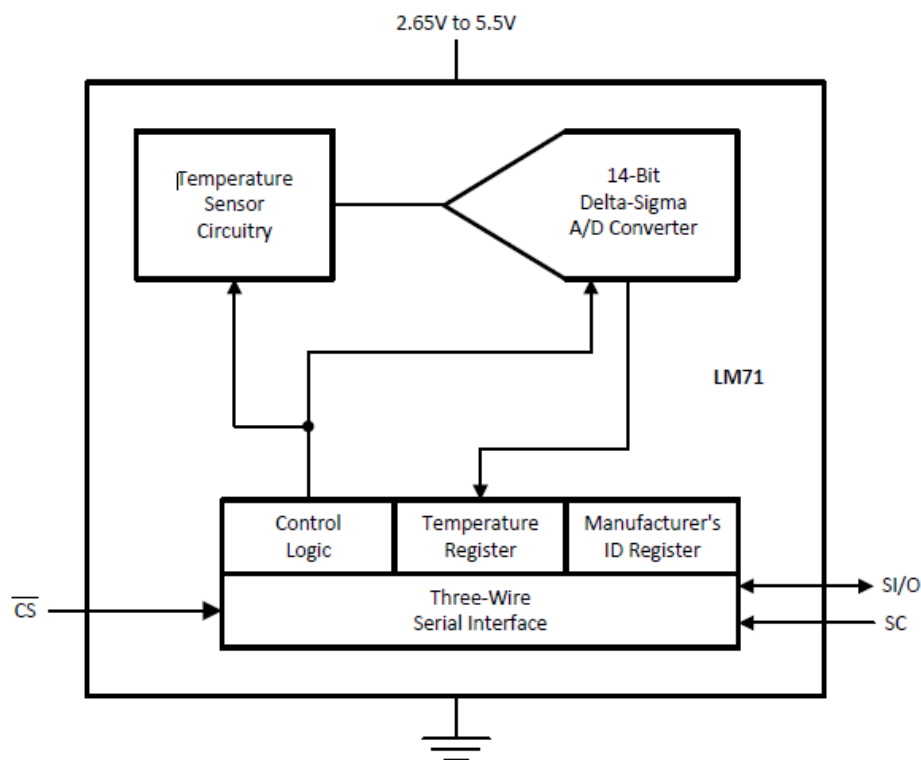


Рис.3.2 – Датчик LM71

Характеристики обраного сенсора наступні:

- діапазон вимірювання температур: -40°C до 150°C ;
- точність вимірювання температури: $\pm 3^{\circ}\text{C}$;
- роздільна здатність: $0.03125^{\circ}\text{C}/\text{LSB}$.
- діапазон напруги живлення від 2,65 до 5,5 В;
- сумісний з інтерфейсами SPI та MICROWIRE.

Сенсор температури LM71 містить первинний вимірювальний перетворювач температури, 13-бітний дельта-сигма АЦП (аналого-цифровий перетворювач),

регістр налаштувань, трьохпровідний послідовний інтерфейс із SPI та MICROWIRE, контрольну логіку. Це дозволяє організовувати простий зв'язок із загальними мікроконтролерами та процесорами.

3.4. Канал вимірювання магнітного поля

Рівень магнітного поля при роботі машини під час проходження полюса ротора над сенсором типово складає 1Тл. Для забезпечення можливості реалізації алгоритму компенсації в якості вимірювача магнітного поля був обраний сенсор HE144T, зовнішній вигляд якого приведений на рис.3.3. Він характеризується широким діапазоном вимірювання магнітного поля, високою чутливістю, низькою похибкою нелінійності, низьким температурним коефіцієнтом, що дозволяє працювати в умовах високих температур [49].

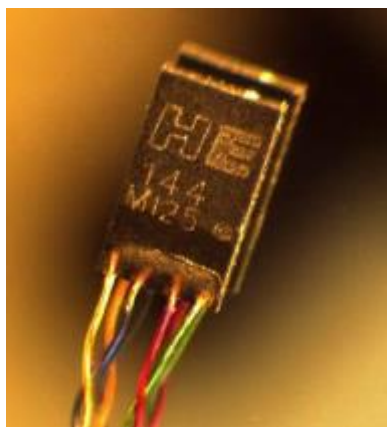


Рис.3.3 – датчик HE144T

Детальні технічні характеристики сенсору магнітного поля наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Технічні характеристики HE144

Електричні характеристики	Значення
1	2
Діапазон магнітного поля	0-10Тл

Продовження таблиці 3.1

1	2
Похибка нелінійності	типова 0,1% до 1,5 Тл
Рекомендований струм живлення	0,1 - 2,0 мА
Омічна напруга зміщення $B = 0 \text{ Т}$	$\leq \pm 12 \text{ мВ}$ при $I = 1 \text{ мА}$
Теплопровідність у повітрі	$\geq 1,5 \text{ мВт / К}$

Так як, даний сенсор має аналоговий вихід та для підключення до АЦП потребує використання проміжного узгоджувального підсилювача. В якості узгоджувального підсилювача був обраний ОРА705. Схема підключення підсилювача до сенсору магнітного поля приведена на рис. 3.4

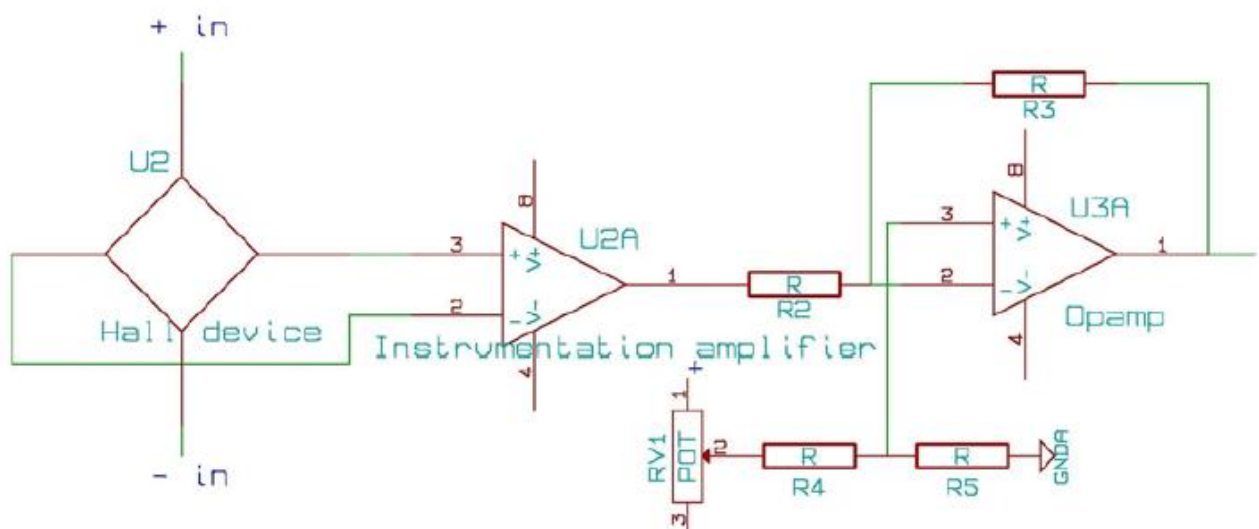


Рис.3.4 Схема підключення підсилювача ОРА705.

3.5. Канал вимірювання повітряного зазору

До складу каналу вимірювання повітряного зазору входить ємнісний сенсор (принцип дії, схему та характеристики див. розділ 2), вимірювальний перетворювач, АЦП та мікроконтролер. Розглянемо більш детально вторинний вимірювальний перетворювач, АЦП та мікроконтролер.

3.5.1. Вторинний вимірювальний перетворювач

Не зважаючи на технічний прогрес та різноманіття технічних рішень, використання типових вторинних перетворювачів для ємнісних сенсорів повітряного зазору є неможливим для вимірювання швидкозмінних процесів, які складають динамічний контроль повітряного зазору, через низьку швидкодію. У цьому разі можливим варіантом є застосування одного з варіантів компенсаційно-мостового вимірювача з аналоговим виходом, як вторинного вимірювального перетворювача для ємнісного сенсора повітряного зазору з компланарними електродами [32].

У пристрої ємність сенсора перетворюється в постійну напругу. Основою пристрою є врівноважена компенсаційно-мостова ланцюг з формуванням керуючого впливу по фазі сигналу нерівноваги [50]. Оскільки ємність сенсора відносно мала, при розробці було вжито заходів щодо захисту вимірювача від паразитних ємностей і від перешкод, в тому числі комутаційних.

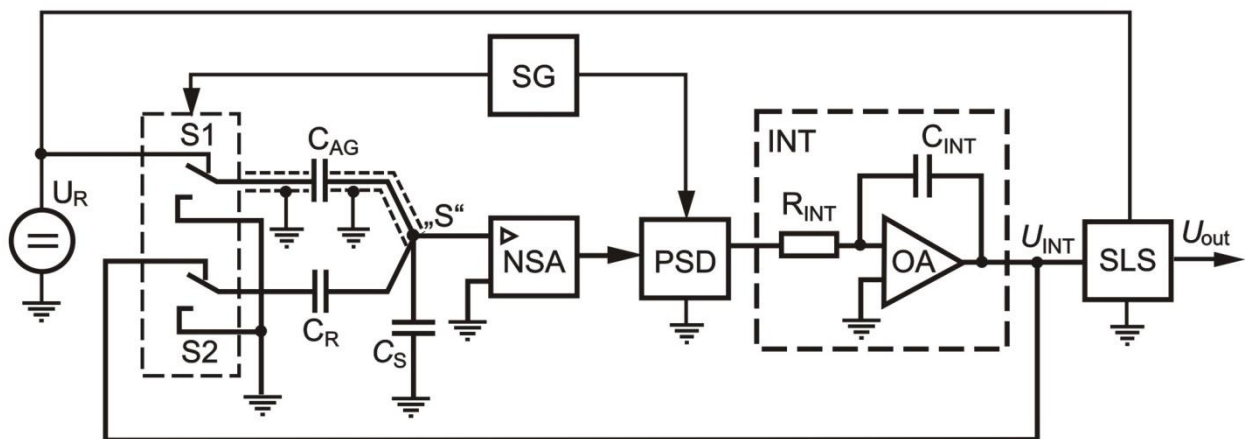


Рис. 3.5 Функціональна схема вторинного вимірювального перетворювача

Функціональна схема перетворювача електричної ємності сенсора повітряного зазору в постійну напругу: U_R - джерело опорної напруги; $S1$, $S2$ - комутатори; SG - комутаційний генератор; C_{AG} - ємнісний сенсор повітряного зазору в гідрогенераторів; C_R - зразковий конденсатор; NSA - підсилювач сигналу нерівноваги; C_S - паразитна шунтуюча ємність; PSD - фазочутливий детектор; INT - інтегратор;

R_{INT} - резистор інтегратора; C_{INT} - конденсатор інтегратора; SLS- схема лінійного масштабування.

У запропонованому вимірювальному перетворювачі стабілізована постійна напруга U_R опорного джерела за допомогою комутатора S1 (ADG1613) перетворюється в прямокутну напругу (меандр) з частотою 75 ... 80 кГц за допомогою комутаційного генератора SG. Напруга меандру з амплітудою, що дорівнює постійній вхідній напрузі, подається на сенсор повітряного зазору, ємність якого є одним з плечей схеми порівняння. Інше плече схеми порівняння - зразковий конденсатор, на який з виходу інтегратора (OPA705) через інший комутатор S2 подається прямокутна напруга амплітудою U_{INT} . Струм, що протікає через ємність сенсора, в точці «s» на вході підсилювача сигналу нерівноваги сумується зі струмом, що протікає через ємність зразкового конденсатора. До цієї ж точки «s» підключена шунтуюча ємність, яка є паразитною ємністю між центральною жилою екранованого проводу сенсора, що підводиться і землею. Вхідний опір наближається за характером до ємнісного, тому ділник з елементів C_S та C_R передає меандр напруги без спотворень, а сигнал нерівноваги в точці «s» або синфазен, або у протифазі сигналу управління комутаторами S1 і S2. Робота цих комутаторів і полярності напруг U_R і U_{INT} узгоджені так, що струми через конденсатори C_{AG} і C_R знаходяться в протифазі один з одним, завдяки чому взаємно віднімаються. При певному співвідношенні ємностей і напруг сумарний струм звертається в нуль, при цьому в точці «s» (на вході) змінна складова з частотою відсутня. Неважко бачити, що це співвідношення виражається формулою:

$$\frac{U_{INT}}{U_R} = \frac{C_{AG}}{C_R}, \quad (3.1)$$

звідки

$$C_{AG} = \frac{U_{INT}}{U_R} C_R \quad (3.2)$$

При порушенні співвідношення (3.1) виникає сигнал нерівноваги, який після переводження через підсилювач NSA надходить на фазочутливий детектор PSD. Опорні напруги PSD синхронні та синфазні з напругою комутації ключів S1 і S2, вони надходять від того ж комутаційного генератора SG, який керує роботою ключів.

Вихідна напруга детектора PSD містить постійну складову, знак якої залежить від напрямку відхилення схеми та від стану рівноваги, а величина - від ступеня цього відхилення. До виходу PSD підключений інтегратор, що складається з резистора R_{INT} , конденсатора C_{INT} та операційного підсилювача. Напруга U_{INT} на виході інтегратора є вихідним сигналом схеми, вона пропорційна вимірюваній ємності сенсора C_{AG} (див. Вираз (3.2)). Далі напруга надходить на схему лінійного масштабування, де нормується для приведення до необхідного діапазону змінної величини, тобто коли $C_{AG} = 0$, то $U_{OUT} = 0$, а коли $C_{AG} = C_{AGmax}$, то $U_{OUT} = 10$ В.

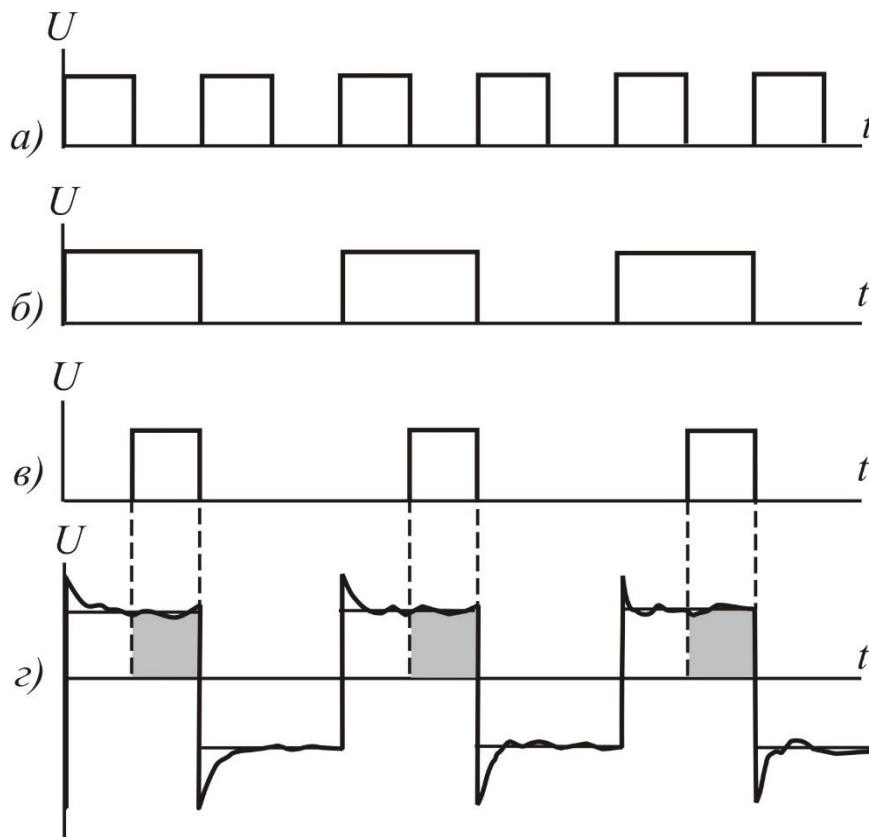


Рис.3.6 Епюри напруг, що діють в перетворювачі.

На Рис.3.6 показані епюри напруг, що діють в схемі, де: а) - напруга, що задається генератором в схемі комутаційного генератора SG; б) - напруга, що подається на входи управління комутаторів S1 і S2; в) - сигнал керування ключами PSD; г) - умовний сигнал нерівноваги на виході NSA.

При рівновазі:

$$U_{\text{INT}} = U_{\text{R}} \frac{C_{\text{AG}}}{C_{\text{R}}} \quad (3.3)$$

Якщо врахувати, що в схемі лінійного масштабування U_{INT} перетворюється в U_{OUT} пропорційно коефіцієнту k , то на виході схеми буде постійна напруга, рівна:

$$U_{\text{INT}} = kU_{\text{INT}} = kU_{\text{R}} \frac{C_{\text{AG}}}{C_{\text{R}}} \quad (3.4)$$

У моменти спрацьовування комутаторів S1 і S2 на вході NSA виникають імпульси комутаційної перешкоди, які викликають в підсилювачі значні перехідні процеси. З метою зменшення впливу цих процесів на роботу пристрою, в PSD використовується не весь сигнал нерівноваги, а тільки друга половина кожного його полуперіоду (виділено затемненим фоном), вільна від комутаційної перешкоди, тобто реалізується метод вагової функції. Для спрощення на епюрах показані тільки сигнали прямої дії, хоча в схемі сформовані також ще і інверсні до них напруги (детектування PSD в двохнапівперіодне).

3.5.2. Обґрунтування та вибір АЦП

На виході вторинного вимірювального перетворювача каналу вимірювання повітряного зазору маємо аналоговий сигнал. Для його перетворення у цифровий вид потребує використання АЦП. Основні параметрами, які необхідно визначити для оптимального вибору АЦП є частота дискретизації та розрядність.

Так як система повинна «встигати» оцифровувати вхідний сигнал з виходу вторинного вимірювального перетворювача сенсора в динамічному режимі ГГ, тобто при номінальній або "угонній" частоті обертання полюсів ротора генератора, то вибір характеристик АЦП необхідно проводити враховуючи характеристики ГГ. Короткі відомості, щодо конструктивних характеристик ГГ, на прикладі СГК-538/160-70 М [46], наведені в таблиці 3.2.

Характеристики ГГ типу СГК-538/160-70 М

Найменування	Значення
Діаметр розточення статора D_i , мм	4930
Довжина полюса ротора b_p , мм	160
Номінальне значення повітряного зазору d , мм	6
Кількість полюсів ротора $2p$	70
Номінальна частота обертання $f_{об}$, об/хв	85.7

Для початку необхідно розрахувати загальний периметр проходження полюсів ротора, щоб визначити в який проміжок часу 1 мм ротора знаходиться над сенсором.

Базуючись на тому, що полюс ротора гідрогенератора СГК-538/160-70 М має довжину $b_p = 160 \text{ мм}$, а їх кількість складає $2p = 70$, то загальна довжина полюсів складатиме:

$$L_r = b_p \times 2p \quad (3.5)$$

$$L_r = 160 \text{ мм} \times 70 = 11200 \text{ мм}$$

З іншого боку, відомо, що діаметр розточення статора дорівнює $D_i = 4930 \text{ мм}$, а номінальне значення повітряного зазору між ротором та статором складає $d = 6 \text{ мм}$, тоді, діаметр огинаючої полюсів ротора розраховується як:

$$D_r = D_i - 2 \times d \quad (3.6)$$

$$D_r = 4930 \text{ мм} - 2 \times 6 \text{ мм} = 4918 \text{ мм}$$

Тоді, загальний периметр проходження полюсів ротора розраховується, як:

$$P_r = \pi \times D_r \quad (3.7)$$

$$P_r = \pi \times 4918 \text{ мм} = 15450,35 \text{ мм}$$

Використовуючи результати розрахунків за виразами (3.5) та (3.7) для міжполюсної відстані будемо мати:

$$l_p = \frac{P_r - L_r}{2p} \quad (3.8)$$

$$l_p = \frac{15450,35 - 11200}{70} = 60,71 \text{ мм}$$

У відповідності до характеристик гідрогенератору СГК-538/160-70 М його номінальна частота обертання складає $f_{об} = 85,7 \text{ об/хв}$ (за $t_{об} = 0,7$ сек здійснюється 1

оберт), тобто над сенсором, що закріплений над розточенні статора, ротор за 0,7 сек проходить відстань $P_r = 15450,35$ мм. У цьому разі 1 мм ротора знаходиться над сенсором наступний проміжок часу:

$$t_{pos} = \frac{t_{об}}{P_r} \quad (3.9)$$

$$t_{pos} = \frac{0,7с / об}{15450,35мм} = 0,045мкс$$

З урахуванням того, що процес вимірювання повітряного зазору доцільно починати проводити, коли обидва електроди сенсора будуть під полюсом ротора, а закінчувати зразу як один із сенсорів вийде за полюс ротора, тоді, враховуючи ширину сенсора будемо мати як активну частину довжини полюса для вимірювання:

$$b_{actp} = b_p - 2 \times b_s, \quad (3.10)$$

де $b_s = 30мм$ - ширина ємнісного сенсора повітряного зазору.

$$b_{actp} = 160мм - 2 \times 30мм = 100мм$$

Тоді, з урахуванням (3.9), час для вимірювання повітряного зазору становитиме:

$$t_{ag} = b_{actp} \times t_{pos} \quad (3.11)$$

$$t_{ag} = 100 \times 0,045 = 4,5мкс$$

При виборі рівня довірчої ймовірності $P = 0.95$ та коефіцієнту Стюдента $t_s = 2.0$ будемо мати необхідність отримання $n = 100$ вибірок за час 4,5мкс, отже час на 1 вибірку становитиме:

$$t_n = \frac{t_{ag}}{n} \quad (3.12)$$

$$t_n = \frac{4,5мкс}{100} = 0,045мкс = 45нс$$

або

$$f = \frac{1}{t_n} = \frac{1}{45нс} = 22,22МГц \quad (3.13)$$

При врахуванні, що в деяких режимах частота обертання ротору гідрогенератора може складати 200 об/хв ("угонна" частота обертання) будемо мати:

$$t_{agdr} = \frac{1}{f_{обдр} \cdot P_r} \times \frac{b_{actp}}{n} \quad (3.14)$$

$$t_{agdr} = \frac{1}{200 об / хв \cdot 15450,35 мм} \times \frac{100 мм}{100} = 19,42 мкс \text{ або } 51,49 кГц$$

У цьому разі, для нашого випадку з урахуванням максимальної частоти обертання 200 об/хв підійде АЦП, що має частоту більшу 51,49кГц.

Розрядність АЦП розраховуємо виходячи з його загальної похибки.

Загальна похибка аналого-цифрового перетворювача складається з похибок квантування $\gamma_{кв}$ і не лінійності γ_n . При чому обидві похибки приймаються рівними половині загальної похибки. Поставивши собі за похибку аналого-цифрового перетворювача 0,1%, отримаємо, що $\gamma_{кв} = \gamma_n = 0,05\%$.

Розрахуємо номінальне число ступенів квантування $N_{АЦП}$ аналого-цифрового перетворювача за формулою (3.15):

$$N_{АЦП} = \frac{1}{\gamma_{кв}}. \quad (3.15)$$

$$N_{АЦП} = \frac{1}{0,0005} = 2000.$$

Розрахуємо розрядність аналого-цифрового перетворювача за формулою (5.6), враховуючи результати рівняння (3.15):

$$n \geq \log_2 N; \quad (3.16)$$

$$n = \log_2 2000 = 10,97 \approx 11.$$

Для забезпечення правильного функціонування каналу необхідно використовувати аналого-цифровий перетворювач, розрядність якого становить не менше ніж $n=11$.

Виходячи з результатів визначення основних параметрів, було обрано мікроконтролер сімейства STM32, який має вбудований АЦП, що задовольняє визначені вимоги.

3.5.3. Мікроконтролер

Мікроконтролером обрана мікросхема серії STM32F051K8, що забезпечує кращу в своїй серії продуктивність. МК має високопродуктивне ядро ARM 32-bit Cortex-M3 з частотою 72 МГц, швидкою пам'яттю, розширеними діапазонами I/O і периферії з підключенням до шин APB. STM32F103C8T6, зовнішній вигляд якого представлений на рис. 3.7, оснащений 12-розрядним АЦП, таймером, стандартними й розширеними інтерфейсами зв'язку: до двох I2C та SPI, три USART, USB та CAN [50]. Режим енергозбереження дає змогу використовувати його в пристроях малої потужності.

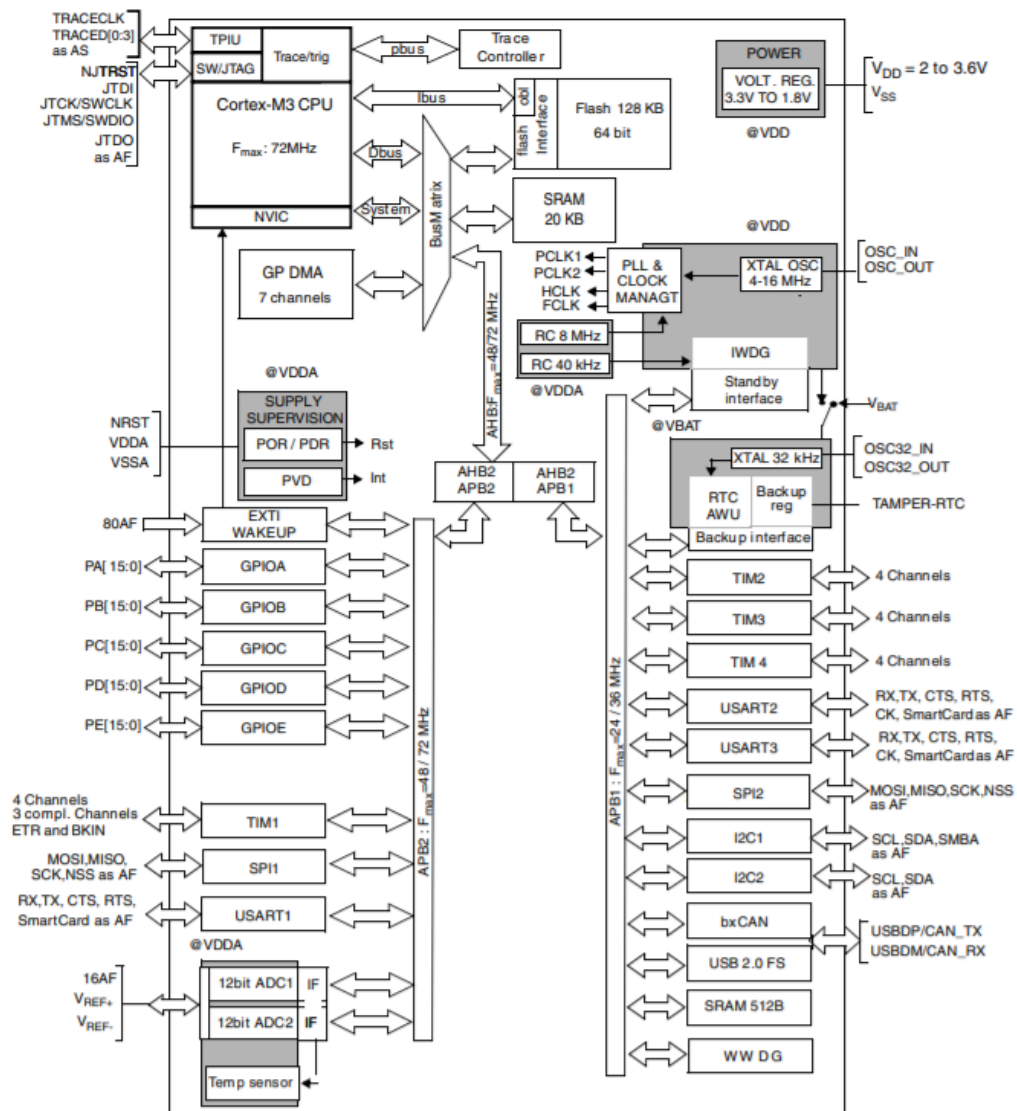


Рис. 3.7 МК STM32F103C8T6

32-бітний МК виконаний за Гарвардською архітектурою (пам'ять програм і даних розділені), має кілька відокремлених шин і 3-ступінчастий конвеєр і понад 10 регістрів загального призначення, що дає змогу виконувати операції паралельно і (більшість) – за один такт, набір інструкцій – Thumb-2 (суміш 16 – і 32-бітових команд, орієнтований на компілятори C/C++).

Підключення МК типове:

- живлення подається через конденсатори відповідно кожному піну VBAT, VDD та VDDA;
- boot через резистор притягнутий до землі;
- кнопка для перезапуску та програмування;
- кварц QZ1 з частотою 32,768kHz.

Окрім цього, авторами [51] були проведені дослідження впливу тангенціальної складової поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6 для визначення можливості його застосування в системах вимірювання параметрів потужних генераторів. Отримані результати підтвердили можливість застосування мікроконтролера STM32F051K8T у структурі систем вимірювання параметрів потужних генераторів у разі дії на них магнітного поля промислової частоти.

Висновки до Розділу 3.

1. Розроблено вимоги до системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів, що дозволило реалізувати структурну схему інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів. В урахуванням вимог були обрані елементи для реалізації інформаційно-вимірювальних каналів системи.

2. Розроблено вторинний вимірювальний перетворювач для ємнісного сенсора, утвореного компланарними паралельними електродами і призначеного для вимірювання повітряного зазору між статором і ротором в потужних гідрогенераторах.

3. Обґрунтовано вибір параметрів аналого-цифрового перетворювача з урахуванням динамічних характеристики руху ротора ГГ.

4. З урахуванням особливостей експлуатації систем керування роботою вимірювальної частини системи контролю параметрів повітряного зазору був обраний мікроконтролера STM32F051K8T6 серії Cortex-M0 характеристики якого повністю забезпечують виконання вимог, що висуваються до системи.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПРЕМЕНЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІВК ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ

Для перевірки результатів досліджень компонентів систем контролю та технічної діагностики, а також для проведення експериментальних досліджень був розроблений та створений макетний зразок вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ. (рис.4.1).

Макетний зразок призначено для експериментальної перевірки ємнісного способу вимірювання повітряного зазору в гідрогенераторах та пристрою, що його реалізує.

Особливістю способу є застосування ємнісного сенсора з паралельними компланарними електродами, принцип дії якого детально розглянуто у розділі 2.



Рис. 4.1 Загальний вид макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору комп'ютеризованої системи технічної діагностики ПГ

4.1. Параметри та технічна характеристика макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ

Система складається із первинного (сенсора) та вторинного перетворювачів; апаратури, для реєстрації та контролю результатів вимірювань у вигляді персонального комп'ютера; з'єднувальних кабелів.

Технічні характеристики макетного зразка

- Номінальна величина вимірювального зазору 6 мм.
- Діапазон вимірювання від 2 до 10 мм (6 ± 4) мм.
- Похибка вимірювання – не більше $\pm 1\%$ від величини номінального зазору ($\pm 0,06$ мм).
- Номінальна швидкість обертання гідрогенератора 85,7 об/хв.
- Вихід вимірювача – аналоговий сигнал напруги.
- Відстань від сенсора до системи контролю – до 10 м.
- Потужність, яку споживатиме первинний та вторинний вимірювальний перетворювач становитиме не більше 1 Вт.
- Габаритні розміри:
 - первинного перетворювача (сенсора) 30мм × 220мм × 1.5м (рис.6.2);
 - вторинного перетворювача 150мм× 150мм × 60 мм.

Робочі умови:

- температури в діапазоні:
- для сенсора – від мінус 40оС до плюс 125оС;
- для вторинного перетворювача – від мінус 15о С до плюс 55о С.
- відносна вологість 90% при температурі плюс 25о С;
- радіальній складовій індукції магнітного поля 1 Тесла для первинного та вторинного вимірювального перетворювача;
- вібрації від 0 Гц до 20 кГц, амплітудою 40 мкм (для сенсора);
- ударних навантажень 30g , 11мс (для сенсора).

4.2. Схема проведення експериментальних досліджень компонентів макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору ІВС контролю ПЗ

Програма випробувань.

Необхідно визначити функціональну залежність значення електричної ємності $C_{екс} = f(d)$ між високопотенціальним та низькопотенціальним електродами сенсора від відстані (зазором) між загальною площиною електродів сенсора та заземленою плоскою металевою поверхнею для підтвердження правильності обраних в розділі 2 конструктивних параметрів сенсора.

Прилади і устаткування.

При проведенні випробувань використовувалися наступні прилади і устаткування:

- 1) Пристрій (стенд) з мікрометричною головкою МГ-15 для задавання переміщення металевої поверхні (зміни величини d) – рис. 4.3.
- 2) Макет зразка вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ, який встановлюється на стенд – рис.4.2.

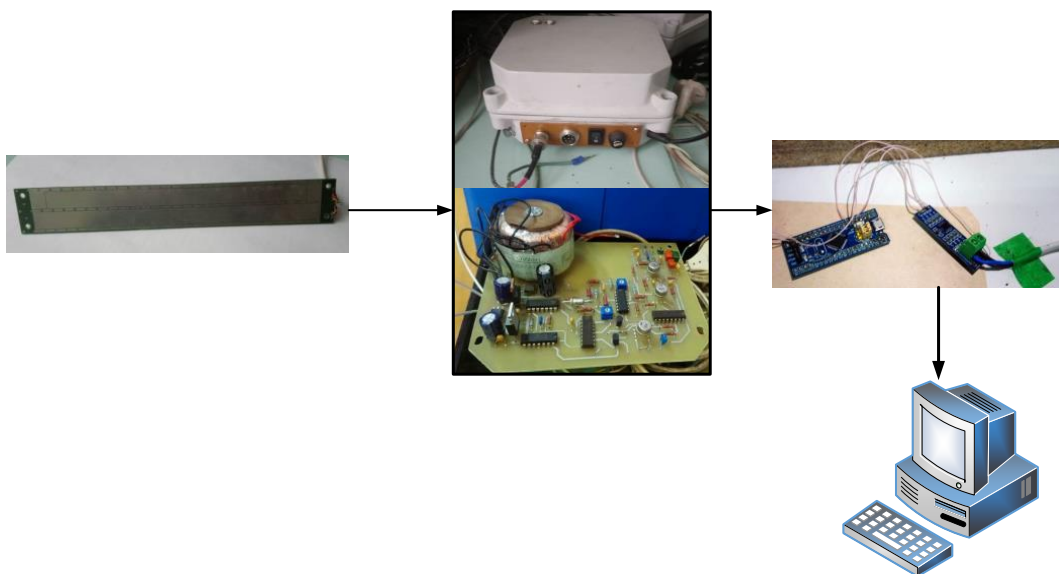


Рис.4.2 Зовнішній вигляд макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ

Конструктивна схема вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ з компланарним ємнісним сенсором складається з таких основних частин: компланарного ємнісного сенсора, що кріпиться до стінки 2 макетного стенду паралельно до площини 1; сенсор підключений до електронного вимірювального блоку, що містить вторинний вимірювальний перетворювач (ВВП), з якого аналоговий сигнал у вигляді напруги надходить до мікроконтролера (МК) STM32F051K8T6 з вбудованим 12-ти розрядним сигма-дельта АЦП; через мікросхему перетворювача інтерфейсів інформація щодо виміряної зміни величини d з МК надходить до персонального комп'ютера (ПК), що містить відповідне програмне забезпечення. Схема випробувань вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ з ємнісним сенсором представлена на рис. 4.3.

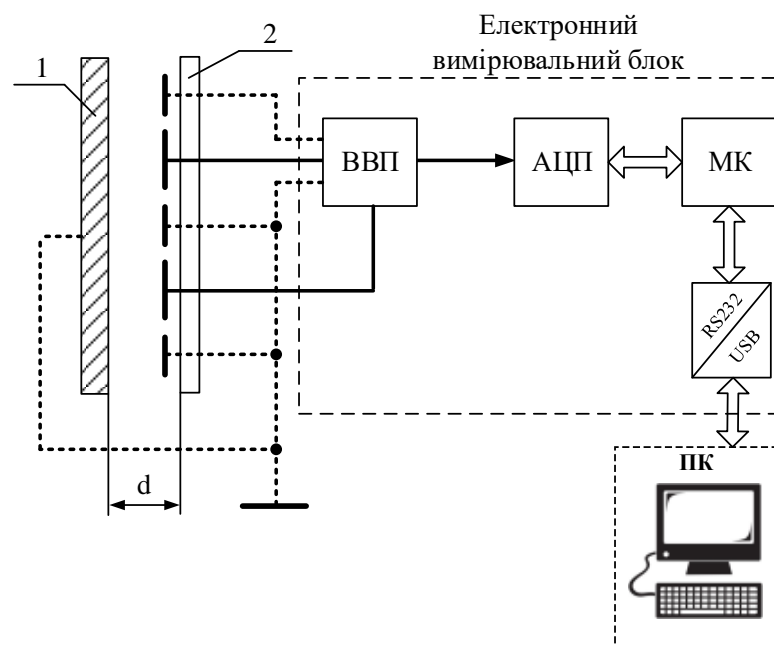


Рис.4.3 Структурна схема випробувань вимірювального каналу повітряного зазору спеціалізованої ІВС контролю ПЗ

Випробування вимірювань електричної ємності $C_{екс}$ в процесі зміни d проводилося за допомогою мікрометричної головки стенду, яка призначена для використання в якості відлікового пристрою вимірювального стенду, в діапазоні від

2мм до 10,0мм з кроком 0,5мм. Зняті показання вимірювання через ІВК повітряного зазору виводяться на дисплей ПК.

Методика проведення випробувань

- 1) Переконалися, що тумблери «МЕРЕЖА» на панелях електронного блоку та персонального комп'ютера знаходяться в положенні "OFF".
- 2) Закріпити ємнісний сенсор на стінці 1 випробувального стенду так, щоб загальна площа електродів розміщувалась паралельно до заземленої стінки 2.
- 3) За допомогою мікрометричної головки стенду встановити початкове значення відстані d_0 між площиною електродів сенсора та заземленою площиною стінки 2 випробувального стенда.
- 4) Підключити живлення до мережевих розеток.
- 5) Ввімкнути тумблери "МЕРЕЖА" на панелях електронного блоку та персонального комп'ютера.
- 6) Ввімкнути ПК і запустити програму для збору і обробки даних.
- 7) Записати серію n вимірювань сигналів ємнісного сенсора досліджуваної зміни величини d .

4.3. Аналіз та результати випробувань макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору ІВС контролю ПЗ

Відповідно до методики викладеної в пункті 4.2, були проведені дослідження вимірювального каналу повітряного зазору. В результаті проведеного експериментального дослідження було отримано 20 базових точок для розрахунку експериментальної функціональної залежності значення ємності від значення повітряного зазору.

При випробуваннях вимірювання досліджуваної зміни величини d в кожній точці проводилися з осередненням результату зі 100 однократних вимірювань для

ємностей $C_{ексП}$ – при прямій зміні зазору d , $C_{ексЗ}$ – при зворотній зміні зазору d та їх середня величина ємності:

$$C_{ексС} = (C_{ексП} + C_{ексЗ}) / 2 \quad (4.1)$$

Результати випробувань макетного зразка вимірювального каналу повітряного зазору і зняття метрологічних характеристик для отримання експериментальної залежності $C_{ексС} = f(d)$ представлені в таблиці 6.1. Графік залежності $C_{ексС} = f(d)$ в порівнянні з результатами комп'ютерного моделювання залежності $C_{КМ} = f(d)$ представлені на рис. 4.4.

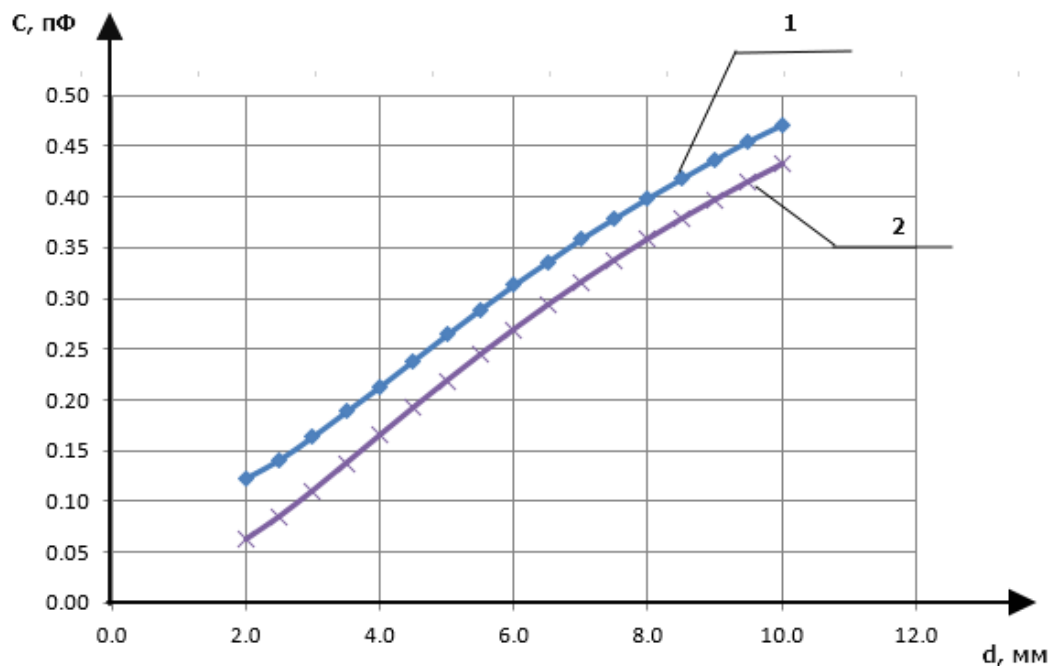


Рис.4.4 Графіки залежності $C_{ексС} = f(d)$: 1 – експериментально отримана залежність; 2 – результати комп'ютерного моделювання

Таблиця 6.1

Результати випробувань макетного зразка

d , мм	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
$C_{ексП}$, пФ	0,138	0,163	0,186	0,211	0,237	0,263	0,288	0,312
$C_{ексЗ}$, пФ	0,143	0,166	0,191	0,213	0,240	0,265	0,290	0,314
$C_{ексС}$, пФ	0,141	0,165	0,189	0,212	0,239	0,264	0,289	0,313

Продовження таблиці 6.1

d , мм	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
$C_{експ, ПФ}$	0,335	0,357	0,378	0,397	0,416	0,436	0,454	0,471	0,568
$C_{ексЗ, ПФ}$	0,336	0,359	0,379	0,400	0,419	0,437	0,455	0,470	0,569
$C_{ексС, ПФ}$	0,336	0,358	0,379	0,399	0,418	0,437	0,455	0,4705	0,569

При порівнянні результатів експериментального отримання залежності та за допомогою комп'ютерного моделювання, видно що обрані конструктивні параметри сенсору (див. розділ 2) є не оптимальними і призводять до адитивної похибки в 1,62мм, одна із складових яких є ємність через підкладку сенсора, яка розраховується за формулою:

$$C_{FR4} = L_2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}} \quad (4.2)$$

де $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$, Ф/м - діелектрична проникність вакууму;

ϵ_r - відносна діелектрична проникність середовища (для FR4 $\epsilon_r = 4,5$).

Провівши розрахунок за формулою (4.2) отримали значення ємності підкладки $C_{FR4} = 0.028nФ$, що складає 55,55% похибки, що була отримана при порівнянні результатів. Останні 44,45% похибки характеризуються впливом паразитної ємності підвідних проводів, що були використані під час проведення дослідження.

Висновки до Розділу 4

- 1) Розроблений вимірювальний канал повітряного зазору між статором і ротором ГГ типу СГК 538/160-70М в діапазоні 6 ± 4 мм завдяки компланарній структурі розміщення електродів має підвищену завадостійкість без застосування апаратно-програмних засобів корекції та дорогих три аксіальний кабелів. Крім того отримані результати підтверджують правильність застосування розрахункової моделі сенсора для визначення функції перетворення.
- 2) Отримані результати підтверджують працездатність макетного зразка спеціалізованої ІВС контролю повітряного зазору з компланарним ємнісним сенсором.
- 3) Отримані результати підтверджують правильність застосування комп'ютерної моделі сенсора для визначення функції перетворення. Різниця в графіках комп'ютерної залежності та експериментальної залежності зумовлена впливом паразитної ємності від підвідних проводів, а також додатковою похибкою від підкладки.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «СПЕЦІАЛІЗОВАНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЗМІНИ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ МІЖ РОТОРОМ ТА СТАТОРОМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН»

5.1. Опис ідеї проекту

Даний розділ присвячений проведенню маркетингового аналізу стартап-проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження як продукту на замовлення. Ідея проекту полягає у створенні спеціалізованої системи, яка дозволить в динамічному режимі виконувати контроль зміни повітряного зазору між полюсами ротора та статора електричних машин (гідрогенераторів), з урахуванням конструктивної особливості та режиму експлуатації.

Цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ризики, в межах яких необхідно шукати групи потенційних клієнтів показані у вигляді таблиць.

Таблиця 5.1

Інформаційна карта проекту

1. Назва проекту	Спеціалізована інформаційно-вимірювальна система контролю зміни повітряного зазору між ротором та статором електричних машин
1	2
2. Автори проекту	Підчібій Олександра Євгенівна
3. Коротка анотація (не більше 1/3 сторінки)	Спеціалізована інформаційно-вимірювальна система контролю зміни повітряного зазору між ротором та статором електричних машин базується на ємнісному методі вимірювання повітряного зазору. Особливістю даного методу є використання ємнісного первинного перетворювача (сенсора) з паралельними компланарними електродами. Принцип дії полягає в вимірюванні електричної ємності між високопотенціальним та низькопотенціальним електродами сенсора (встановленого на поверхні розточення осердя), яка функціонально залежить від відстані між загальною поверхнею електродів та поверхнею полюса ротора, що в свою чергу дозволяє отримати більш точні, в порівнянні з аналогами, показники інформативного параметру.

Продовження таблиці 5.1

1	2
	Система може бути використана в складі контрольно-діагностичного комплексу моніторингу технічного стану як старих, так і модернізованих електричних машин і агрегатів роторного типу в таких галузях промисловості, як гідроенергетика, будівельна, металургійна та гірничодобувна промисловості, а також в інших галузях промисловості, що пов'язані з застосуванням машин і агрегатів роторного типу.
4. Термін реалізації проекту	15 місяців <i>Тривалість проекту (в місяцях)</i>
5. Необхідні ресурси	1. Фінансові 2. Матеріальні: - 4 сенсора; - мікроконтролер; - з'єднувальні кабелі; 3. ІТ-ресурси – програмне забезпечення. 4. Інтелектуальні. <i>Перелік усіх необхідних ресурсів (фінансових, матеріальних інтелектуальних та ін.)</i>
6. Опис проблеми, яку вирішує проект	Динамічний контроль зміни повітряного зазору ротор-статор в електричних машинах та агрегатах роторного типу забезпечує значну та своєчасну інформацію про його структурний стан. Це ефективний інструмент для моніторингу структурних проблем, пов'язаних із огинаючими полюсами ротора, слабкою структурою ротора, нерівномірним термічним розширенням ротора і статора, а також структурними змінами фундаменту статора.
8. Головні цілі та завдання проекту	Основними цілями використання системи контролю повітряного зазору є: • Сприяти мінімізації втрат доходу за рахунок запобігання несправності повітряного зазору від ротора до статора. • Для надання допомоги у плануванні та технічному обслуговуванні електричних машин. • Надати інженерному персоналу цінні динамічні дані для аналізу.
9. Очікувані результати <i>(Описати позитивні зміни, які відбудуться в результаті реалізації проекту після його завершення та в довгостроковій перспективі)</i>	
Отримана інформація при використанні системи допоможе уникнути дорогих наслідків вимушених простоїв від дефектів статора або ротора, аварійних ситуацій та своєчасно ліквідувати дефекти, що в свою чергу дозволить розширити безпечний період експлуатації електричних машин.	

Отже, запропонована система призначена для контролю зміни повітряного зазору між ротором та статором, що одним із найважливіших інформативних параметрів фактичного стану електричних машин. Вона може бути використана в складі контрольно-діагностичного комплексу моніторингу технічного стану як старих, так і модернізованих електричних машин і агрегатів роторного типу в таких галузях промисловості, як гідроенергетика, будівельна, металургійна та гірничодобувна промисловості, а також в інших галузях промисловості, що пов'язані з застосуванням машин і агрегатів роторного типу. Завдяки динамічному отриманню інформації стосовно фактичного стану агрегату можливо підвищити надійність його роботи, а також значно скоротити час простоїв, пов'язаних з незапланованим ремонтом. За умови високої ефективності контролю стає можливим перехід від запланованих ремонтів до ремонтів згідно з фактичним станом електричної машини.

Для визначення потенційних техніко-економічних переваг ідеї, її необхідно порівняти із пропозиціями конкурентів, а саме:

- визначити перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;
- визначити попереднє коло конкурентів, що вже існують на ринку та провести збір інформації щодо значень техніко-економічних показників;
- провести порівняльний аналіз показників, що мають: а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні значення (N, нейтральні); в) кращі значення (S, сильні).

Таблиця 5.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	Концепції конкурентів			W	N	S
		Мій проект	Конкурент 1 Система захисту та моніторингу серії 3500	Конкурент 2 Smart Machinery Health Management			
1	2	3	4	5	6	7	8

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Застосування в різних галузях промисловості, що пов'язані з використанням машин і агрегатів роторного типу	Інтеграція системи з урахуванням характеристик конструкції та експлуатації машин	Лише в гідроенергетиці	Лише в гідроенергетиці	-	-	+
2.	Отримання даних в реальному часі	Динамічне зчитування та обробка інформації	Отримання інформації за запитом	Динамічне зчитування та обробка інформації	-	+	-
3.	Вимірювальна точність	Висока точність	Досить точний	Досить точний	-	-	+
4.	Показники надійності системи	Високий рівень надійності	Досить надійний	Високий рівень надійності	-	+	-
5.	Показники модульності системи	Гнучкість, взаємозамінність та можливості конфігурування під різні умови експлуатації	Гнучкість, взаємозамінність та можливості конфігурування під різні умови експлуатації	Гнучкість, взаємозамінність та можливості конфігурування під різні умови експлуатації	-	+	-
6.	Вартість замовлення	Від 1000\$	Від 2000\$	Від 200 000\$	-	-	+

Проведений аналіз показав, що сильними сторонами ідеї є можливість інтеграції системи в різні галузі промисловості, що пов'язані з використанням машин і агрегатів роторного типу, з урахуванням характеристик їх конструкції та експлуатації, висока точність вимірювань, а також низька вартість в порівнянні з конкурентами. До нейтральної сторони відносяться такі показники, як надійність та модульність системи, отримання даних в реальному часі.

Даний перелік характеристик та властивостей ідей потенційного продукту є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Створення спеціалізованої системи контролю зміни повітряного зазору між ротором та статором в працюючих електричних машинах і агрегатах роторного типу	Метод лазерної тріангуляції	Необхідно розробити	Частково доступні
2.		Ультразвуковий метод		
3.		Електроємнісний метод	Наявні, але необхідно доробити	Доступні
4.		Електромагнітний метод	Необхідно розробити	
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: електроємнісний метод вимірювання повітряного зазору.				

Виходячи з проаналізованих даних можна стверджувати, що технологічна реалізація здійснення проекту доступна. Обрана технологія реалізації є доступною та достатньо гнучкою для доробок, всі інші технології потребують значного вкладу як фінансового, так і інтелектуального.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

У даному підрозділі визначаються ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, що можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	14 млн.дол
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги до ISO 7919-5:2005
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	40%

Відповідно до попереднього аналізу характеристик потенційного ринку можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження, цьому сприяє відсутність обмежень для входу та позитивна динаміка ринку.

Специфіка галузі використання проекту передбачає дотримання певних вимог та стандартів, однак, ці умови були враховані під час проектування системи, тому вони не є бар'єром для реалізації.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Потреба у отриманні контрольної діагностичної інформації фактичного стану генеруючого обладнання, а також у здешевленні налагодження апаратури контролю повітряного зазору.	Гідроенергетика	Особливість конструкції та експлуатації генеруючого обладнання	Висока якість, індивідуальний підхід, висока точність вимірювання, надійність, оптимальне співвідношення ціни та якості.
2		Промисловість, що пов'язана з використанням машин і агрегатів роторного типу		
3		Дослідницькі інститути	Фінансові можливості	

Аналіз характеристик потенційних клієнтів показав, що цільовою аудиторією є підприємства в області гідроенергетики, галузі промисловості, що пов'язані з використанням машин та агрегатів роторного типу, а також дослідницькі інститути. Різниця у поведінці обумовлена особливістю конструкції та експлуатації генеруючого обладнання, так, наприклад, типові гідрогенератори можуть мати відмінні технічні характеристики в залежності від розташування ГЕС. Окрім цього, більшість підприємств та дослідницьких інститутів відносяться до державного сектору, тому мають значні фінансові обмеження для придбання коштовного

контрольно-діагностичного обладнання. Таким чином, потреби цільових споживачів формуються на оптимальному співвідношенні ціни та якості.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 4.6-4.7). Аналіз факторів дає змогу побачити можливості і загрози. Методика визначення ринкових можливостей і загроз дозволяє оцінити вплив зовнішніх чинників. При застосуванні даної технології існують певні загрози. (табл. 5.6).

Таблиця 5.6

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Зріст конкуренції	Поява конкурентно-спроможних фірм	Покращення характеристик системи, створення нових конкурентних переваг
2.	Нові технології	Збільшення конкурентоздатних методів контролю зміни повітряного зазору	Модернізація системи та методу, впровадження нових технологій
3.	Стандарти	Зміна вимог стандартів	Покращення системи до рівня визначених вимогами стандартів
4.	Збій поставок комплектуючих	Неналагодженість логістики	Мати декілька постачальників.
5.	Вартість технології	Вартість розробки	Консультація, переймання досвіду, мозковий штурм для здешевлення технології виготовлення, застосування інших комплектуючих, зменшення ціни.

У відповідності з проаналізованими факторами загроз робимо висновок, що однією із найімовірніших загроз є зріст конкуренції, тому для уникнення цієї загрози завчасно можна завчасно можна проробити систему для створення додаткової конкурентної переваги, наприклад ціни. Поява змін у стандартизації та більш

обґрунтованих методів контролю є також істотною загрозою, однак вирішення цих питань можливе за рахунок модернізації системи та впровадження нових технологій. Інші загрози також є важливими, тому не враховувати їх буде помилкою, адже кожен фактор може призвести до провалу продукту в цілому.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (табл. 5.7).

Таблиця 5.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Політика протекціонізму	Захист вітчизняного виробника внаслідок чого буде розвиватися галузь споживача стартапу	Залучення у коло споживачів споріднених галузей
2.	Вільний ринок	Відсутність вітчизняних виробників на внутрішньому ринку	Можливість швидкого розвитку
3.	Фактор збуту	Можливість впровадження продукту через національну закупівлю	Сертифікація товару за міжнародними стандартами, що збільшить його привабливість для національних тендерів
4.	Еволюція продукту	Впровадження нових технологій	Розвиток продукту з додавання нових функцій, покращення алгоритму роботи
5.	Нові групи клієнтів	Використання продукції у різних сферах	Аналіз потреб потенціальних покупців

У таблиці 4.8 приведено основні можливості, що сприятимуть розвитку продукту стартапа. Серед розглянутих вище сприятливих факторів основними є вільний ринок та фактори збуту, за умови політик протекціонізму, адже це призведе до швидкого розвитку на вітчизняному ринку та збільшення сукупного попиту в

країні, що в свою чергу веде до створення інших сприятливих факторів, які описані в таблиці вище. Дані фактори можуть привести до:

- покращення характеристик системи;
- кращого розуміння потреб ринку за рахунок глибшого аналізу;
- зниження ціни.

Далі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Олігополістична конкуренція	Галузь в основному є конкурентною, проте існує декілька явних лідерів	Важко вийти на міжнародний рівень
2. Глобальний рівень конкурентної боротьби	Конкуренти з різних країн світу	Розвиток на українських підприємствах та вихід на ринок
3. Внутрішньогалузева конкуренція	Конкуренція спостерігається лише в галузі гідроенергетики	Розробка однонаправленої продукції (яка вирішує одну, але добре, проблему)
4. Товарно-видова конкуренція	Конкуренція між товарами одного виду	Створення кращої і якіснішої продукції
5. Ціновий характер	Продукція дуже дорога	Зменшити вартість
6. Марочна конкуренція	Конкурентні компанії пропонують подібний продукт.	Зниження цін на товар; концентрація діяльності на якісну зміну продукту. Створення власної торгової марки.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку показав, що не дивлячись на конкуренцію лідерів, у запропонованого проекту є можливість розвитку на українських підприємствах з виходом на ринок. Можливі дії компанії, щоб бути

конкурентоспроможною, це створення добре відомої марки та зменшення ціни на продукцію.

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.9).

Таблиця 5.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові ринку		Висновки
Прямі конкуренти в галузі	В Україні таких не має; В США: “Emerson Electric”	Конкуренція на внутрішньому ринку відсутня, однак є серйозний конкурент на світовому ринку, тому має бути значна перевага
Потенційні конкуренти	Аналоги даному рішенню	Строки входження на ринок мінімальні. Навіть наявність потенційних конкурентів не є перепорою для входження
Постачальники	Розміри поставок мають значення	Зазвичай постачальники не диктують умов співпраці
Клієнти	Підприємства в області енергетики; Галузі промисловості, що пов’язані з використанням машин та агрегатів роторного типу; Дослідницькі інститути	На жаль, клієнти диктують умови роботи на ринку, тому потрібно переконати, що даний проект набагато краще і саме те, що вони хочуть
Товари–замінники	Загрози з боку замінників присутня та має свій вплив	Конкурентна перевага, собівартість

Зробивши аналіз попередніх таблиць приходимо до висновку, що конкуренція не заважатиме працювати на ринку. Замінники існують, проте повністю задовольнити потреби не можуть, оскільки створювались із використанням у вузькій сфері, тому не можуть повністю задовольнити потреби.

Проаналізувавши таблиці:

- 5.2 та 5.3: визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту;

- 5.5: характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту;
- 5.6: фактори загроз;
- 5.7: фактори можливостей;
- 5.9: аналіз конкуренції в галузі за М. Портером.

Визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 5.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Потреби споживачів	Потреби споживачів обумовлюють необхідність розробки проекту
2.	Технічні характеристики	Висока точність вимірювання, завадостійкість системи
3.	Наявність гнучкої ієрархії в системі	Будова системи передбачає наявність структурованої ієрархії та її швидку зміну
4.	Ціна та собівартість продукції	Не завищена, конкурентна ціна.
5.	Відсутність прямих конкурентів в країні	Відсутність прямих конкурентів дає можливість продукту претендувати на державні закупівлі, та маніпулювати ринком, доки конкуренти не з'являться.

Аналізуючи таблицю 5.10 приходимо до висновку, що проект стартапу є конкурентоспроможним завдяки таким факторам як: потреба споживачів, що обумовлена необхідністю контролю параметрів генеруючого обладнання за для уникнення аварійних ситуацій та вимушених простоїв; технічні характеристики системи, які забезпечують її точність та завадостійкість; надійність та ін. Зазначені фактори визначають користь для потенційного користувача.

За даними, що представлені в таблиці проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 5.11

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Спеціалізована інформаційно-вимірювальна система контролю зміни повітряного зазору між ротором та статором електричних машин»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “Emerson Electric”						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Потреби споживачів	17				+			
2	Технічні характеристики	19						+	
3	Наявність гнучкої ієрархії в системі	18					+		
4	Ціна та собівартість продукції	20							+
5.	Відсутність прямих конкурентів	16		+					

Отже, аналізуючи конкурентоспроможні фактори приходимо до висновку, що сильними факторами для системи є: технічні характеристики, доступна ціна та собівартість. Очевидно, що система може скласти конкуренцію існуючим аналогам.

Заключним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження продукту є створення SWOT-аналізу.

Таблиця 5.12

SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - технічні характеристики; - ціна та собівартість продукції; - наявність гнучкої ієрархії в системі; - відповідає потребам споживачів. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - вузька галузь використання; - низька репутація підприємства на початку впровадження проекту в життя.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> - впровадження продукту через національні закупівлі; - впровадження нових технологій; - залучення нових груп клієнтів. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> - зріст конкуренції; - зміна вимог у стандартах; - збій поставок комплектуючих; - зниження доходів потенційних клієнтів.

Зробивши SWOT-аналіз, бачимо сильні та слабкі сторони проекту. Наявність загроз обумовлена можливим зростом конкуренції, тобто появою нового «гравця» на внутрішньому ринку країни, а також внесенням змін щодо точності вимірювання параметрів повітряного зазору. На противагу їм, приділено більшу увагу функціональним можливостям та компонентам із яких складається продукт, що дає змогу задовільнити потреби користувачів.

Наступним кроком стане альтернатива ринкової поведінки та оптимальні строки реалізації для виведення стартап-проекту.

Таблиця 5.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	1 рік
2	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Низька	8 місяців
3	Глибший аналіз ринку	Середня	6-8 місяців

З зазначених альтернатив обираємо стратегію нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Для аналізу ринкових можливостей необхідно розробити ринкову стратегію, тому першим кроком є визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Сфера енергетики	Готові	Зростає	Наявні	Легко
2	Галузі підприємств, що пов'язані з використанням агрегатів та машин роторного типу	Частично готові(50%)	Середній попит	Наявні	Можливість входу 65%
3	Наукова сфера	Готові	Спадає	Наявні	Легко
Які цільові групи обрано: Сфера енергетики					

Після проведення аналізу цільових груп, готовності споживачів прийняти продукт, простоти входу та інтенсивності, приходимо до висновку, що обрана цільова група є найкращим варіантом для реалізацію продукції. Була обрана стратегія концентрованого маркетингу, оскільки компанія зосереджується на одному сегменті ринку.

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку, що представлена нижче.

Таблиця 5.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Концентрований маркетинг	Технічні характеристики, гнучка будова системи, співвідношення якості та ціни	Стратегія спеціалізації

За базову стратегію розвитку було обрано стратегію спеціалізації, оскільки вона передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, тобто має на меті задоволення потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Частково продукція є першопрохідцем на ринку	Будуть залучатись нові клієнти, а також переманювати клієнтів від конкурентів	Не буде сліпого копіювання, буде наслідування, синтез ідей, генерування власних ідей	Стратегія заняття конкурентної ніші

В якості конкурентної поведінки обрано стратегію заняття конкурентної ніші, оскільки головною особливістю є малий розмір ринкового сегменту. Ця конкурентна стратегія являється похідною від такої базової стратегії компанії, як концентрація.

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект (табл. 5.17).

Таблиця 5.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Технічні характеристики	Стратегія спеціалізації	Висока точність вимірювання та завадостійкість	Точність, надійність, індивідуальний підхід до контролю стану агрегатів
2	Гнучка побудова системи		Легка зміна конфігурації системи під визначені умови та потреби	
3	Ціна		Доступна цінова політика	

Згідно з вимогами, що висуваються до товару та обраною базовою стратегією була визначена стратегія позиціонування проекту за трьома ознаками, а саме точність, надійність та індивідуальний підхід до контролю стану агрегатів.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Наступним кроком є розроблення маркетингової програми. Першим кроком стане розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач у випадку вибору продукції нашої компанії.

Таблиця 5.18

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Контроль стану повітряного зазору в динамічному режимі	За рахунок автоматизації відпадає потреба із залучення людських ресурсів	Приваблива ціна порівняно із аналогами. Постійна технічна підтримка. Безперебійна робота системи. Систематизація та спрощення обробки результатів контролю.

Таким чином, головними перевагами пропонованого проекту є приваблива ціна порівняно із аналогами присутніми на ринку, високий рівень технічної підтримки, забезпечення безперебійної роботи системи.

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Таблиця 5.19

Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Продукт надає можливість в динамічному режимі контролювати зміну повітряного зазору з врахуванням зовнішніх факторів впливу. Можна виділити наступні вигоди використання: <ul style="list-style-type: none"> - Контроль технічного стану електричних машин. - Максимально точне визначення розмірних характеристик повітряного зазору між ротором та статором.

Продовження таблиці 5.19

Рівні товару	Сутність та складові		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Точність	Нм	Тх
	2. Широкий діапазон вимірювальних каналів	М	Тх
	3. Гарантійний термін (довгий термін гарантійного обслуговування)	Нм	Е
	4.Вартість обслуговування (Низька вартість обслуговування)	М	Вр
	Якість: відповідає нормам ISO 7919-5:2005, ISO 13381-1:2015, ISO 20816-1:2016		
III. Товар із підкріпленням	Пакування: запакований в коробку в якій містяться: електронний блок, комплект сенсорів, з'єднувальні кабелі, кабель живлення, а також інструкція по встановленню та експлуатації із зазначенням всіх технічних характеристик системи.		
	Марка: відсутня на момент реалізації приладу		
	До продажу: проведення семінарів та рекламних компаній за темами впровадження та практичного застосування спеціалізованої системи контролю.		
Після продажу:			
<ul style="list-style-type: none">- Проведення консультацій персоналу як особистих, так і за допомогою цілодобової телефонної лінії, мережі Internet, поштою.- Проведення сервісних робіт зі встановлення обладнання та пусконаладжувальної діяльності.			
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Від копіювання товар буде захищено шляхом патентування елементної бази системи та принципів її роботи та надання кожній проданій системі копію індивідуального ліцензійного коду, який необхідно вводити при запуску системи.			

Відповідно до таблиці 5.19 було отримано опис трьох рівнів моделі товару з зазначенням його властивостей та характеристик. До продажу клієнти мають змогу ознайомитися з роботою проекту, а після продажу буде цілодобова технічна підтримка та сервісний супровід. За рахунок патентування елементної бази та принципів роботи системи продукт буде захищений від копіювання.

Далі визначаємо цінові межі, якими необхідно користуватися при визначенні ціни продукту, щоб він користувався попитом на ринку (табл. 5.20).

Таблиця 5.20

Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	80 000 – 200 000 ум.од	60 000 – 150 000 ум.од	≈10 млн. ум.од/рік	20 000 – 100 000 ум.од

Присутні на ринку аналоги пропонованого проекту знаходяться в ціновому діапазоні 60 000 – 150 000 ум.од., тому наш проект має в 3 рази кращу цінову перевагу ніж аналоги. Середній дохід цільової групи споживачів становить близько 10 млн. ум.од. на рік, тому пропонована система має значні перспективи реалізації на ринку при правильній стратегії розповсюдження та маркетингу.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.21).

Таблиця 5.21

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Замовлення згідно підписаного контракту	Доставка товару покупцю, його встановлення, налаштування та первинне калібрування	Канал збуту нульового рівня	Власна система збуту, сайт компанії

Для зменшення прямих витрат при формуванні системи збуту зразків інформаційно-вимірювального обладнання планується залучення ресурсів мережі інтернет власними силами конструкторського колективу – виробника системи. Для

інтенсифікації продажу, а також подальшого супроводу, планується безпосередня комунікація замовника із конструкторським колективом.

Останньою складової маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22).

Таблиця 5.22

Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Пошук продукту, що відповідав би потрібними характеристиками за доступною ціною	Мережа інтернет, виставки, семінари, друкована продукція	Висока точність вимірювання та завадостійкість Легка зміна конфігурації системи під визначені умови та потреби. Доступна цінова політика.	Проінформувати клієнта про те, що за допомогою системи стає можливим надійне та точне визначення показників стану повітряного зазору.	Хочете забезпечити ефективне використання наявного генеруючого обладнання роторного типу на Вашому підприємстві? – Ми знаємо як Вам допомогти! Ваші працівники скаржаться на часту відмову електричних машин? – Наші прилади допоможуть Вам знайти причину відмов!
			Надати клієнту інформацію про можливість індивідуального налаштування та калібрування системи під конкретний експлуатаційний цикл електричної машини	

Результатом даного підпункту є ринкова програма яка включає концепцію збуту, просування, аналіз ціноутворення, вона залежить від цінностей та потреб потенційних клієнтів, переваги ідеї, стану ринку на якому буде впроваджено проект

на даний момент та його динаміку, та відповідну обрану альтернативу поведінки на ринку.

Висновки до Розділу 5

Узагальнюючи проведений аналіз стартап-проекту можна зробити висновок що розробка даного проекту цілком обумовлена потребою в ньому, адже по всім техніко-економічним характеристикам він або рівний з аналогічними інформаційно-вимірювальними засобами контролю, або ж навіть краще за них. Проект обіцяє бути прибутковим з точки зору рентабельності. З огляду на потенційні групи клієнтів перспективи впровадження проекту є високими. Крім того є багато можливостей в його подальшому розвитку, таких як розширення функцій, сертифікація товару за міжнародними стандартами, що збільшить його привабливість для національних тендерів, підвищення попиту, підвищення ціни, покращення товару, залучення іноземних інвестицій, патентування нових ідей та методів.

Альтернативною стратегією була обрана нейтралізація ринкових загроз сильними сторонами стартапу, оскільки вона найшвидша у виконанні. В якості базової стратегії розвитку обрано стратегію концентрації – зосередження на одному споживчому сегменті. За цим же критерієм була обрана базова стратегія розвитку - стратегія спеціалізації, так як ми маємо справу з невеликою часткою ринку, які вибирають адаптивну лінію поведінки на ринку, усвідомлюють своє місце на ній і йдуть у фарватері фірм-лідерів.

В якості конкурентної поведінки обрано стратегію заняття конкурентної ніші, оскільки головною особливістю є малий розмір ринкового сегменту. Ця конкурентна стратегія являється похідною від такої базової стратегії компанії, як концентрація. Для забезпечення ефективних продаж продукту та інформування потенційних клієнтів із особливостями його роботи, рекомендованими умовами технічної експлуатації – доцільно проведення публічної презентації результатів проекту серед цільової групи користувачів та широкого кола науковців на профільних заходах. Необхідно надати можливість проведення тестових вимірювань продуктом на протязі серії робочих днів з можливістю залучення сторонніх фахівців для навчання персоналу замовника. Планується участь у профільних виставках інформаційно-вимірювального обладнання, наукових конференціях із демонстрацією роботи

приладу в Україні. Основною маркетинговою стратегією реалізації продукту серед цільової групи клієнтів є проведення дієвої рекламної компанії за допомогою електронних ресурсів, профільних для галузі застосування засобу вимірювань, для зацікавлення продуктом потенційних користувачів. Важливим є зворотній зв'язок з клієнтами, удосконалення вимірювального засобу відповідно до рекламаций клієнтів що виникли в процесі його технічного обслуговування. Враховуючи малосерійне виробництво вимірювального засобу для ринкової реалізації проекту можна обрати початок продаж нашого продукту в мережі інтернет для одного сегменту ринку (гідроенергетики). Після закріплення на ринку доцільно починати шукати клієнтів в інших сегментах та розширювати канали збуту.

ВИСНОВКИ

Отримані результати в даній магістерській дисертації присвячені вирішенню важливих задач розвитку теоретичних основ та практичної реалізації спеціалізованих систем контролю повітряного зазору в гідрогенераторах, шляхом створення нових та удосконаленням існуючих методів, засобів та компонентів, які мають покращені технічні характеристики та є завадостійкими до чинників середовища, що впливають на визначення та контроль значення повітряного зазору.

В процесі вирішення цих задач в роботі були отримані наступні результати:

1. На основі аналітичного огляду сучасних методів, систем та засобів контролю повітряного зазору визначено, що найбільш поширеними та мають більшу перевагу системи, які в своєму складі мають ІВК з ємнісним типом сенсорів. Це обумовлено тим, що сенсори такого типу мають наступні переваги:
 - лінійність вихідних характеристик;
 - достатньо проста конструкція, що легко піддається розрахунку та відтворенню;
 - висока стійкість до впливу магнітних полів та високих температур;
 - висока чутливість вимірювання.
2. Розроблено математичну та комп'ютерну модель сенсора. Під час дослідження комп'ютерної моделі сенсора та її функції перетворення виявлено, що:
 - міжелектродний зазор має прямий вплив на функцію перетворення, тобто зі збільшенням міжелектродного зазору збільшується значення ємності;
 - зміна товщини електродів практично не впливає на функцію перетворення;
 - зі збільшенням товщини діелектричної підкладки збільшується ємність сенсору;
 - вплив всіх вище перерахованих факторів (чинників) мають адитивний характер.
3. На основі результатів дослідження комп'ютерної моделі були визначені оптимальні конструктивні параметри сенсора та підтверджена можливість застосування ємнісного сенсора з запропонованою системою електродів для

вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в капсульному гідрогенераторі типу СГК 538/160-70М в діапазоні 6 ± 4 мм.

4. Розроблено вимоги до системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів, що дозволило реалізувати структурну схему спеціалізованої інформаційно-вимірювальної системи контролю параметрів повітряного зазору потужних генераторів.
5. Розроблено вторинний вимірювальний перетворювач для ємнісного сенсора та його макетний зразок, який має підвищену завадостійкість без застосування апаратно-програмних засобів корекції та дорогих триаксіальних кабелів.
6. Створено макетний зразок ІВК визначення повітряного зазору до складу якого входять: ємнісний сенсор, вторинний перетворювач, мікроконтролер та ПК.
7. Результати експериментальних досліджень підтвердили:
 - правильність розрахунків комп'ютерної моделі;
 - працездатність розробленого (створеного) ІВК системи;
 - можливість реалізації запропонованої системи в цілому.
8. На основі проведеного аналізу розробленого стартап проекту було визначено, що проект цілком обумовлений потребою в ньому, має високі перспективи для впровадження та подальшого розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ISO 7919-5:2005 Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants. [Released: 2005-04]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2005. 16 p.
2. Левицький А.С., Федоренко Г.М., Грубой О.П. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242с.
3. Поташник С.И., Левицкий А.С., Федоренко Г.М. Некоторые дефекты капсульных гидрогенераторов и их идентификация с помощью датчиков воздушного зазора // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: Зб. наук. пр. — К.: ІЕД НАНУ, 2009. — Вип 24. — С. 67-74. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/63727/12-Potashnik.pdf>
4. Machine condition monitoring. URL: <https://www.koncar-institut.hr>
5. Adamowski, Julio & Souza, Alan & Perez, Nicolás & Lima, Allan & Oda, Paulo & Tiba, Hamilton. Ultrasonic dynamic air-gap monitoring system for large hydro-generators. 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). P. 1311-1314. DOI:10.1109/ultsym.2013.0335
6. CHURCHILL, T.L., Ross, J.M., “Dynamic Air Gap Measuring Device for use with Rotating Electrical Machinery”, United States Patent, n. 4704906, November, 1987.
7. Комплекс лазерной диагностики динамической формы ротора, формы статора и воздушного зазора гидрогенератора. URL: <http://www.sarges.rushydro.ru/>
8. Круглова Т.Н., Ярошенко И.В., Мельников М.А., Работалов Н.Н. Метод лазерной диагностики динамической формы ротора гидрогенератора // Инженерный вестник Дона, 2015, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2777
9. Iris Power AGTracII. URL: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf>
10. 3500 System. URL: <https://www.instrumart.com/assets/3500-System-Datasheet.pdf>

11. Air Gap Monitoring system. URL: <https://www.mc-monitoring.com/monitoring-solutions/airgap-monitoring.html>
12. Smart Machinery Health Management. URL: <http://cfile221.uf.daum.net/attach/275C184055790A1F2FBB54>
13. Air Gap Monitoring System. URL: https://www.marubun.co.jp/legacy/product/measurement/electric/qgc18e000000ohx-att/AGMS_E.pdf
14. 4000 Series Air Gap Sensor Datasheet. URL: <https://dam.bakerhughes.com/m/4dfdaa01abf81f67/original/4000-Series-Air-Gap-Sensor-System-Datasheet-167885-pdf.pdf>
15. Air Gap Transducer «AGT-212». URL: https://rennosonic.com/rennosonic/wp-content/uploads/2020/05/Air-Gap_Datasheet.pdf
16. Capacitive Air Gap Measuring Chains «VM3.12». URL: <https://library.vibrosystem.com/en/Manuals/9428-25M4A-100.pdf>
17. Air Gap Sensor AGS. URL: <http://www.mikrotrend.com/PDF/ags-installation-and-user-manual.pdf>
18. CS25 Capacitive Sensor. URL: <http://www.sensonics.co.uk/wp-content/uploads/2019/05/DS1242-CS25.pdf>
19. Air Gap Sensor - EQ 2431-A. URL: https://www.bkvibro.com/file-admin/mediapool/Internet/Instructions/Sensors/Air_gap_sensors/EQ2431-A_Air_Gap_5-25mm_vers_17.pdf
20. Capacitive Air Gap Probe CGP-02. URL: <https://irispower.com/products/capacitive-air-gap-sensor/>
21. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору між статором та ротором в генераторах: пат. 117841 Україна: МПК G01B 7/14, G01D 5/24. №a201604728; заявл. 28.04.2016; публ. 10.11.2017, Бюл. №19
22. Вознесенский А. С. Компьютерные методы в научных исследованиях. Часть 2. Компьютер-ное моделирование физических объектов и процессов горного производства: Учебник для студентов специальности 130401 «Физические процессы горного или нефтегазового производства».- М.:МГГУ, 2011, 107 с.:ил. URL: <http://www.geokniga.org/books/16335>

23. Жидков А.В. Применение системы ANSYS к решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные системы в математике и механике». Нижний Новгород, 2006, 115 с.
24. ANSYS Maxwell. URL: <https://cadfem.com.ua/software/ehlektromagnetizm/ansys-maxwell/>
25. COMSOL Multiphysics может взаимодействовать с программой MATLAB. URL: <http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/ru/>
26. ELCUT. URL: <http://elcut.ru/index.htm>
27. Elmer. URL: <http://www.elmerfem.org/blog/>
28. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов / Б.А. Алексеев. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1998. 152 с.
29. Левицкий А.С., Новік А. І., Неболюбов Є. Ю. Створення ємнісного вимірювача повітряного зазору між ротором та статором в потужних гідрогенераторах. Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2010. №26. С.54 – 62.
30. Mikalauskas R., Volkovas V. Air gap modelling and control possibilities in rotary systems // Ultragasas. – 2003. – Nr.1(46). – P. 7–11.
31. L. Nan, G. Bao-long, W. Pai, Proximity capacitance sensor design for noncontact liquid detection, in: Proc. 2nd Int. Congress Image and Signal Processing CISP'09, 2009, pp. 1-4. DOI:10.1109/CISP.2009.5304525
32. Сухорукова А. Е., Левицкий А. С., Зайцев Е. А., Березниченко В. А. Измерительный преобразователь для ёмкостного сенсора воздушного зазора в гидрогенераторе // Приборы и методы измерений. 2020. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeritelnyy-preobrazovatel-dlya-yomkostnogo-sensora-vozdushnogo-zazora-v-gidrogeneratore>
33. Кромпляс Б.А., Левицкий А.С., Зайцев Є.О. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук.пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 43. – С. 134–136.

34. Левицький А.С., Зайцев Є.О., Кромпляс Б.А. Похибки ємнісного вимірювача зазору в гідрогенераторі. Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2016.№.44. С.50–55.
35. Min-Hang Bao, Chapter 4 - Electrostatic driving and capacitive sensing. Handbook of Sensors and Actuators. Volume 8, 2000, Pages 139-198. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1386276600800183>
36. Джежора А.А. Электроемкостные преобразователи и методы их расчета: монография. Минск : Белорусская наука, 2008. 305 с.
37. Евстигнеев В. В., Хомутов О. И., Горбова Г. М. Перспективные направления проектирования и принципы расчета бесконтактных емкостных измерителей микроперемещений // Ползуновский альманах. – Барнаул, 1999. – № 2. – С. 45-58
38. IPC-2221B. Generic Standard on Printed Board Design. [Released: 2012-11]. 2012. 207p.
39. ANSI/IPC A-600H. Acceptability of Printed Boards. [Released: 2010-01].2010. 168p.
40. Зайцев Є.О., Сухорукова О.Є. Дослідження моделі сенсору повітряного зазору в потужних гідрогенераторах на основі комп'ютерного моделювання.// Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXI міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 14-15 травня 2020 р.). – К.: Інтерсервіс, 2020. – с.506-512
41. Компанія SEA. URL: www.sea.com.ua
42. Компанія «PCB ETAL. URL: <https://pcbetal.com/>
43. Компанія «СК-Техно». URL: <http://spcb.com.ua/>
44. Кромпляс Б.А., Левицький А.С., Зайцев Є.О., Похибки ємнісного вимірювача зазору в гідрогенераторі. Праці Інституту електродинаміки НАН України. 2016.№.44. С.50–55.
45. IPC-4101C. Specification for Base Materials for Rigid and Multilayer Printed Boards. [Released: 2009-08]. 2009. 127p.
46. Генератор синхронный горизонтальный капсульный гидротурбинный типа СГК-2-538/160-70. Требования к качеству аттестованной продукции.

47. ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines ISO79 [Released: 2016-11-30]. ISO/TC 108/SC 2 Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures, 2016. 46 p
48. LM71/LM71-Q1 SPI/MICROWIRE 13-Bit Plus Sign Temperature Sensor. URL: https://www.ti.com/lit/ds/snis125e/snis125e.pdf?ts=1607641861407&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
49. Analog Hall Sensor HE144. URL: <https://asensor.eu/onewebmedia/Datasheet-HE144X.pdf>
50. Новик, А.И. Особенности построения измерительных цепей для работы с емкостными датчи-ками / А.И. Новик, Ю.П. Колупаев, В.В. Нужненко, А.В. Стадник // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 66–70.
51. Плата розробника STM32F103C8T6 ARM STM32. URL: <https://arduino.ua/docs/datasheetSTM32F103.pdf>
52. М. В. Панчик, А. С. Левицький, Б. А. Кромпляс, Є. О. Зайцев,. Дослідження впливу магнітного поля промислової частоти на стабільність функціонування мікроконтролера STM32F051K8T6 / Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2019. № 52. С. 80-86.

ДОДАТОК А

Стаття прийнята до публікації в збірнику праць XV Науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні».

УДК 621.317

*О.Є.Сухорукова, студентка гр.ПВ-91мп
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»*

СИСТЕМА ДІАГНОСТУВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ ГІДРОГЕНЕРАТОРІВ З ЄМНІСНИМИ СЕНСОРАМИ

Анотація. В роботі проведений аналіз існуючих технічних рішень світової практики в області контролю, моніторингу та діагностики повітряних зазорів гідрогенераторів. На основі проведеного огляду розроблена структурна схема системи діагностування повітряного зазору. В системі для компенсації впливу температури та магнітного поля внутрішнього середовища генератора використовуються дані з додаткових сенсорів.

Ключові слова: гідрогенератор, повітряний зазор, ємнісний сенсор, система.

ВСТУП

Одним з постачальників електроенергії країни, що покриває пікові навантаження в добовому графіку енергосистеми, є Київська ГЕС, до складу якої входить близько 20 капсульних гідрогенераторів типу СГК 538/160-70М[1]. При цьому для забезпечення їх безперебійної та надійної роботи є актуальним розробка інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем діагностування повітряного зазору, що можуть бути використані при випробуваннях нових та модернізації існуючих капсульних гідрогенераторів типу СГК538/160–70М Київської ГЕС. Використання систем дозволяє забезпечити визначення параметрів таких дефектів гідрогенератора, як ексцентриситет і перекіс ротора, еліптичність розточення осердя, а також забезпечити можливість проведення оцінки технічного стану машини, виявляти дефекти на ранній стадії, спрогнозувати їх подальший розвиток, запобігти виникненню аварійних ситуацій і продовжити ресурс генераторного обладнання.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Для продовження терміну експлуатації обладнання ГЕС в світовій практиці, на сьогоднішній день, впроваджуються програми використання систем технічної діагностики основних вузлів генеруючого обладнання, яке відслужило свій розрахунковий термін експлуатації в 20-30 років. Однією з перших універсальних систем контролю стану гідроагрегату з додатковими сенсорами є система VIMOS (Vibration Monitoring System), що була розроблена в 90-х роках минулого століття компанією ABB (ASEA-Brown Boveri Ltd.) для ГЕС Швеції[2]. Вона містить сенсори вібрації, безконтактні сенсори переміщення напрямних підшипників по осях X і Y, сенсори переміщення підп'ятників, а також сенсори контролю повітряного зазору між статором і ротором. Для вирішення комплексного питання з автоматизації процесів

керування та діагностики гідрогенераторів з можливістю оперативного захисту, прогнозування та контролю робочих процесів генеруючого обладнання компанія Emerson Electric (США) пропонує Smart систему CSI 6500 Machinery Health™ Monitor. Дана система має можливість налаштування апаратно-програмної частини під конкретний тип гідрогенератора[2].

Система Air gap monitoring system, розроблена компанією MC-monitoring SA (Швейцарія), має модульну архітектуру та призначена для вимірювання повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора. Принцип роботи системи заснований на використанні ємнісного давача AGS-525, що підключений до модулю обробки та збору даних PMS-100[2,3]. Ця система використовується на ГЕС "Iron Gate" Hydroelectric Power Station, яка знаходиться між Румунією та Сербією.

Компанія Iris Power LP (Канада) розробила систему Iris Power, що включає ємнісні датчики повітряного зазору типу CGP-02, прилад і діагностичне програмне забезпечення AGTracII On-Line Air Gap Monitoring for Hydro Generators[2,4]. Крім того, платформу можна розширити, включивши в неї магнітний потік ротора, а також вібрацію вала і підшипника для більш комплексної системи контролю геометрії і динамічних властивостей гідрогенераторів.

На даний час найбільш універсальним комплексом для безперервного контролю є система моніторингу стану вузлів гідрогенератора ZOOM (Zero Outage On-line Monitor), розроблена компанією VibroSystM Inc. (Канада). Даний комплекс має відкриту архітектуру, яка дозволяє вимірювати не тільки повітряний зазор, а і кілька інших призначених для користувача параметрів одночасно[2,5].

Однак, всі вище зазначені системи були розроблені з врахуванням індивідуальних потреб, що пов'язані з особливістю конструкторсько-технологічними рішеннями тієї чи іншої ГЕС, також вони не в повній мірі задовольняють сучасним вимогам. Недоліками такого підходу є необхідність значної адаптації, вище приведених систем, до конструктивних особливостей гідрогенератору, технічних стан якого необхідно діагностувати.

Перераховані проблеми в значній мірі визначають необхідність розробки спеціалізованих систем діагностування для гідрогенераторів з урахуванням їх конструктивних та експлуатаційних характеристик.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Одним із основних параметрів гідрогенераторів, є повітряний проміжок між статором та ротором, який головним чином визначає якість електроенергії на виході генератора. Це пов'язано з тим, що повітряний зазор - це номінальна або вимірювана величина між ротором гідрогенератора і статором, або буквально кажучи, це «серце» гідрогенератора, оскільки в повітряному проміжку механічна енергія перетворюється на електричну енергію. Отже, розробка систем діагностування повітряного проміжку гідрогенераторів енергетичного комплексу України, а особливо для їх роботи в динамічних режимах є актуальною задачею.

Вирішення такої задачі можливе за застосування системи діагностування приведеної на рис.1, яка має блочно-модульну архітектуру, що дозволяє забезпечити

чином для синхронізації роботи системи контролю та діагностики повітряного зазору з іншими системами технічного діагностування потужних генераторів.

ВИСНОВКИ

Застосування запропонованої системи дозволяє вирішити завдання моніторингу стану електроенергетичного устаткування і створення системи діагностування з підвищеною завадостійкістю, що дозволяє підвищити надійність роботи вітчизняних гідрогенераторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] ДП ЗАВОД «ЕЛЕКТРОВАЖМАШ». Гідрогенератори. – Режим доступу: URL: http://spetm.com.ua/images/KATALOG_HYDRO_UKR_ref.pdf
- [2] Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів / Зайцев Є. О., Левицький А. С., Кромпліас Б. А., Сидорчук В. Є. // *Електротехнічні та комп'ютерні системи: наук.-техн. журн.* – 2017. – 7(1). – С.13–19.
- [3] Air Gap Monitoring System. – Режим доступу: URL: https://www.giga-tech.it/media/prodPdf/Doc.%20AirGap_93_AyIM6_it.pdf
- [4] Continuous On-Line Air Gap Monitoring for Hydro Generators. – Режим доступу: URL: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2016/11/Iris-Power-Air-Gap-Condition-Monitoring-AGTracII-Brochure.pdf>
- [5] ZOOM System for Hydroelectric Generators. – Режим доступу: URL: <https://www.vibrosystm.com/en/documents/pdf?f=en/Datasheets/96VT-HYD1A-101.pdf>

Наук. керівник – д.т.н., проф. Єременко В.С.

ДОДАТОК Б

Публікація, яка входить у міжнародні наукометричні бази даних Scopus, Web of Science: журнал «Приборы и методы измерения». Том 11.

УДК: 621.317.335.2; 621.313.322-82

Измерительный преобразователь для ёмкостного сенсора воздушного зазора в гидрогенераторе

А.С. Левицкий, Е.А. Зайцев, В.А. Березниченко, А.Е. Сухорукова

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина

Поступила 22.01.2020

Принята к печати 04.03.2020

Одним из важнейших параметров мощных гидрогенераторов является воздушный зазор между ротором и статором, и его отклонение от заданных норм является дефектом, который может привести к серьёзным авариям. Поэтому величину и форму зазора необходимо контролировать как во время осмотров, так и при эксплуатации машины. Целью данной работы являлась разработка вторичного измерительного преобразователя, обеспечивающего точность и разрешающую способность, для ёмкостного сенсора зазора, образованного компланарными параллельными электродами.

Рассматриваются особенности измерения воздушного зазора в мощных гидрогенераторах, а также существующие современные методы и средства измерений. Показано, что для измерения зазора в гидрогенераторах одним из наиболее подходящих средств является измеритель, в состав которого входит ёмкостный сенсор, устанавливаемый на расточке сердечника статора. Серийно выпускаемые измерители зазора с ёмкостными сенсорами по своим некоторым характеристикам не всегда подходят для использования в гидрогенераторах.

Предложен вторичный измерительный преобразователь с улучшенными характеристиками для ёмкостного сенсора зазора, образованного компланарными параллельными электродами.

Преобразователь разработан на основе уравновешенной компенсационно-мостовой измерительной цепи с формированием управляющего воздействия по фазе сигнала неравновесия. Приведена структурная схема преобразователя и описан алгоритм её работы. Рассмотрен процесс формирования в схеме измерительного выходного сигнала, пропорционального рабочей ёмкости сенсора.

Применение ёмкостного сенсора с компланарными параллельными электродами и предложенного вторичного измерительного преобразователя позволит обеспечить высокую точность и разрешающую способность при измерении воздушного зазора.

Ключевые слова: гидрогенератор, воздушный зазор, ёмкостный сенсор, измерительный преобразователь.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Адрес для переписки:

Е.А. Зайцев
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина
e-mail: zaitsev@i.ua

Address for correspondence:

I.O. Zaitsev
The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine
e-mail: zaitsev@i.ua

Для цитирования:

А.С. Левицкий, Е.А. Зайцев, В.А. Березниченко, А.Е. Сухорукова
Измерительный преобразователь для ёмкостного сенсора
воздушного зазора в гидрогенераторе.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 1. – С. 33–41.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

For citation:

A.S. Levytskyi, I.O. Zaitsev, V.O. Bereznychenko, O.E. Sukhorukova
[Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor
in Hydrogenerator].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 1, pp. 33–41 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor in Hydrogenerator

A.S. Levytskyi, I.O. Zaitsev, V.O. Berezhnychenko, O.E. Sukhorukova

*The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine*

Received 22.01.2020

Accepted for publication 04.03.2020

Abstract

One of the most important parameters of powerful hydro generators (HG) is the air gap between the rotor and the stator, and its deviation from the set norms is a defect that can lead to serious accidents. Therefore, the size and shape of the gap must be monitored both during inspections and during operation of the machine. The aim of this paper was to develop a secondary measuring transducer providing accuracy and resolution for a capacitive gap sensor formed by coplanar parallel electrodes.

It is shown that the reliability and safety of operation of powerful HG inextricably depend on the timely detection of their defects, especially during operation. One of the most important parameters of the HG is the air gap between the rotor and the stator, and its deviation from the set norms is a defect that can lead to serious accidents. Therefore, the size and shape of the gap must be monitored both: during inspections and during operation of the machine. The paper discusses the features of measuring the air gap in a powerful HG, as well as existing modern methods and means of measurement.

It is shown that for measuring the gap in capsule HG, one of the most suitable means is a meter, which includes a capacitive sensor mounted on a central bore of the stator core. Commercially available gap meters with capacitive sensors are not suitable for use on HGs. Commercially available meters with capacitive sensors, by their certain characteristics, are not always suitable for use on HGs.

A secondary measuring transducer with improved characteristics is proposed for a capacitive gap sensor formed by coplanar parallel electrodes.

The converter is developed on the basis of a balanced compensation bridge measuring circuit.

The control action in the device is formed by the phase of the unbalancing signal.

The structural diagram of the converter is presented and the algorithm of its operation is described. The process of forming a measuring output signal proportional to the sensor working capacitance in the circuit is considered.

The use of a capacitive sensor with coplanar parallel electrodes and the proposed secondary measuring transducer will ensure high accuracy and resolution when measuring the air gap.

Keywords: hydro generator, air gap, capacitive sensor, measuring transducer.

DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Адрес для переписки:
Е.А. Зайцев
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, г. Киев 03680, Украина
e-mail: zaitsev@i.ua

Для цитирования:
А.С. Левытский, Е.А. Зайцев, В.О. Березныченко, О.Е. Сухорукова
Измерительный преобразователь для емкостного сенсора
воздушного зазора в гидрогенераторе.
Приборы и методы измерений.
2020. – Т. 11, № 1. – С. 33–41.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Address for correspondence:
I.O. Zaitsev
The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, Kyiv 03057, Ukraine
e-mail: zaitsev@i.ua

For citation:
A.S. Levytskyi, I.O. Zaitsev, V.O. Berezhnychenko, O.E. Sukhorukova
[Measuring Transducer for Air Gap Capacitive Sensor
in Hydrogenerator].
Devices and Methods of Measurements.
2020, vol. 11, no. 1, pp. 33–41 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-33-41

Введение

Одним из самых опасных дефектов крупных гидрогенераторов (ГГ) является нарушение формы и изменение величины воздушного зазора между ротором и статором [1–3]. Такой дефект может привести к серьёзным авариям с задеванием ротора за статор, разрушением обмоток, стали статора и полюсов. Появление дефекта вызывается воздействием различных явлений в машине. Согласно [1, 2] воздушные зазоры между статором и ротором в гидрогенераторах в диаметрально противоположных точках не должны отличаться друг от друга более чем на 20 % от среднего значения, если инструкциями изготовителя не предусмотрены более жёсткие нормы. Для капсульных ГГ, в которых воздушный зазор составляет всего несколько миллиметров, отклонение зазора от нормируемых значений является особенно опасным.

Поэтому для обеспечения нормального функционирования ГГ величину воздушного зазора необходимо контролировать как при периодических осмотрах, так и, что особенно важно, в процессе эксплуатации.

В настоящее время известны измерители воздушного зазора, принцип действия которых основан на различных принципах. Так в работе [4] описаны ультразвуковые измерители, состоящие из двух пар ультразвуковых преобразователей, устанавливаемых в вентиляционных каналах статора ГГ. Однако такие приборы можно применять только на остановленной машине, так как сильные магнитные поля, существующие во время работы машины, окажут разрушающее воздействие на первичные преобразователи. В работе [5] описана система контроля воздушного зазора больших низкоскоростных синхронных ГГ, в которой применены индуктивные сенсоры. Так как эти сенсоры в своем составе содержат намотанные катушки, то их также нельзя использовать на работающем ГГ.

Среди современных измерителей воздушного зазора мощных электрических машин (в том числе и ГГ) наибольшее распространение получили измерители с использованием ёмкостных сенсоров [6–9]. Сенсоры этих систем помещаются в зазор между статором и ротором ГГ и закрепляются на расточке сердечника статора. Достаточная информативность контроля с использованием этих систем, особенно при контроле формы сердечника, достигается за счёт

определённого количества сенсоров. Так с использованием системы AGMS [6] для определения состояния воздушного зазора ГГ с ротором до 7,5 м в диаметре рекомендуется использовать четыре сенсора, от 7,5 до 12 м – восемь сенсоров, более 12 м – двенадцать или шестнадцать сенсоров.

Однако конструктивные особенности сенсоров и некоторые технические характеристики ёмкостных измерителей не удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к приборам, предназначенным для использования на ГГ с малым номинальным воздушным зазором (например, капсульных ГГ типа SGK 538/160-70 [2]). Кроме этого, в паспортах измерителей не указывается такой параметр, как быстродействие. А этот параметр, который в большой степени определяет достоверность измерения зазора, зависит от числа оборотов ротора машины, числа полюсов и диаметра расточки сердечника статора.

Результаты исследований ёмкостного измерителя зазора, представленного в работе [2], дают возможность разработать сенсор, который может быть использован в ГГ любого типа с номинальным зазором до 50 мм. Сенсор представляет собой пластину, на которой сформированы рабочий потенциальный электрод и охранный электрод. Охранный электрод расположен вокруг потенциального электрода и имеет такой же потенциал, но гальванически с ним не связан. При контроле измеряют электрическую ёмкость между рабочим потенциальным электродом и заземленным полюсом ротора ГГ. Такая геометрия и потенциалы электродов создают равномерное поле в зазоре измерительного конденсатора, что даёт возможность устранить влияние краевых эффектов на точность измерения. Устройство имеет высокие метрологические характеристики, в том числе и быстродействие, но его недостатком является сложность вторичного измерительного преобразователя.

На рисунке 1 представлена схема установки ёмкостных сенсоров воздушного зазора на расточке сердечника статора ГГ типа SGK 538/160-70М, в котором номинальный воздушный зазор составляет 6 мм [2].

В работе [10] проведены исследования, позволяющие разработать ёмкостный сенсор зазора, выполненный в виде двух параллельных компланарных электродов с некоторым заземлённым промежутком между ними. Электрическая ёмкость между компланарными электродами

изменяется практически линейно с изменением зазора. Используя результаты исследований, соответствующим образом изменяя геометрию электродов, можно создать сенсор также на диапазон измерения до 50 мм.

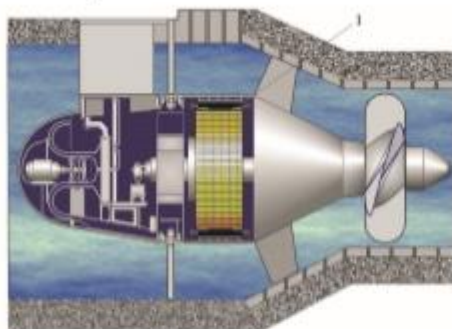


Рисунок 1 – Схема установки ёмкостных сенсоров зазора на сердечнике статора гидрогенератора SGK 538/160-70: 1 – ёмкостные сенсоры

Figure 1 – Installation diagram of capacitive gap sensors on the stator core of the hydrogenerator SGK 538/160-70: 1 – capacitive sensor

Для работы с сенсором данного типа был разработан вторичный преобразователь на основе микросхемы AD7745, преобразующей ёмкость сенсора в 24-разрядный код. Главным преимуществом устройства является то, что вторичный преобразователь конструктивно размещается непосредственно на пластине сенсора, рядом с его электродами, что позволяет сводить к минимуму влияние паразитных наводок. Недостатком устройства является наличие значительной динамической погрешности, обусловленной скоростью вращения ротора машины и размерами полюсов ротора. Поэтому измеритель зазора такого типа в основном может быть использован при осмотрах и ремонтах машины, т.е. при малых скоростях вращения ротора.

Целью данной работы являлась разработка вторичного измерительного преобразователя, обеспечивающего точность и разрешающую способность, для ёмкостного сенсора зазора, образованного компланарными параллельными электродами.

Ёмкостный сенсор

Конструктивная схема ёмкостного сенсора с компланарными параллельными электродами показана на рисунке 2 [10].

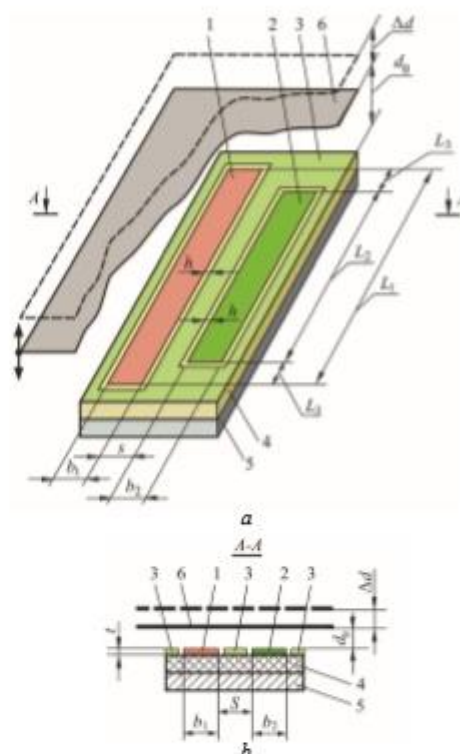


Рисунок 2 – Конструктивная схема ёмкостного сенсора зазора с двумя компланарными параллельными электродами: а – общий вид сенсора; б – поперечный разрез сенсора; 1 – высокопотенциальный электрод; 2 – низкопотенциальный электрод; 3 – низкопотенциальный охранный электрод; 4 – диэлектрическая подложка; 5 – металлическая подложка; 6 – заземлённый полюс ротора; L_1 – длина электрода 1; L_2 – длина электрода 2; $L_3 = 0,5(L_1 - L_2)$; b_1 – ширина электрода 1; b_2 – ширина электрода 2; s – расстояние между электродами 1 и 2; d_0 – начальное расстояние (начальный зазор) между общей плоскостью электродов 1, 2, 3 и полюсом ротора 6; Δd – изменение зазора d_0 ; h – изоляционные прокладки между электродами 1, 2, 3; t – толщина тонкоплёночных металлических электродов 1, 2, 3

Figure 2 – Capacitive gap sensor design with two coplanar parallel electrodes: а – sensor general view; б – sensor cross section; 1 – high potential electrode; 2 – low potential electrode; 3 – low potential guard electrode; 4 – dielectric substrate; 5 – metal plate; 6 – grounded rotor pole; L_1 – length of electrode 1; L_2 – length of electrode 2; $L_3 = 0,5(L_1 - L_2)$; b_1 – the width of the electrode 1; b_2 – the width of the electrode 2; s – the distance between the electrodes 1 and 2; d_0 – the initial distance (initial gap) between the common plane of the electrodes 1, 2, 3 and the pole of the rotor 6; Δd – change in clearance; h – insulating gaps between the electrodes 1, 2, 3; t – thickness of thin-film metal electrodes 1, 2, 3

Электрическая ёмкость C_{12} между электродами 1 и 2 изменяется с изменением расстояния $d = d_0 \pm \Delta d$ между общей плоскостью электродов 1, 2, 3 и полюсом ротора 6. Часть ёмкости C_{12} через диэлектрическую подложку 4 составляет ничтожно малую величину, зависящую от материала и толщины сенсора.

Переменная (информативная) часть ёмкости при выполнении условий $L_3 \gg d_0$, $h \rightarrow 0$, $t \rightarrow 0$, $b_1 = b_2 = b$ определяется выражением:

$$C_{12} = L_2 \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\pi} \ln \frac{\left(\operatorname{th} \frac{\pi s}{4d} + \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \right)^2}{4 \operatorname{th} \frac{\pi(s+2b)}{4d} \operatorname{th} \frac{\pi s}{4d}}. \quad (1)$$

где $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\varepsilon_r = 1,00056$).

Вторичный измерительный преобразователь

Измерители, в состав которых входят ёмкостные сенсоры с компланарной системой электродов, в основном применяются для неразрушающего контроля материалов при одностороннем доступе [11–19]. Так, работа [11] посвящена теоретическим основам создания измерителей влажности ортотропных материалов (волокон, лент, бумаги, шпона и др.), [14] – измерителей влажности человеческой кожи, [15] – приборов контроля композитных авиационных материалов, [17] – приборов контроля качества бетонных плит, [16, 19] – приборов для исследования многослойных диэлектриков. К сожалению, результаты этих исследований применить для решения задачи измерения перемещений заземлённой плоской поверхности относительно общей плоскости двух компланарных не представляется возможным.

В данной работе для сенсора с компланарными параллельными электродами предлагается вторичный преобразователь, обеспечивающий высокие метрологические характеристики, в том числе точность, разрешающую способность и быстродействие. В устройстве ёмкость сенсора преобразуется в постоянное напряжение. Основой устройства является уравновешенная компенсационно-мостовая цепь с формированием управляющего воздействия по фазе сигнала

неравновесия [20]. Поскольку ёмкость сенсора относительно мала, при разработке были приняты меры по защите измерителя от паразитных ёмкостей и от помех, в том числе коммутационных.

Упрощённая блок-схема устройства приведена на рисунке 3.

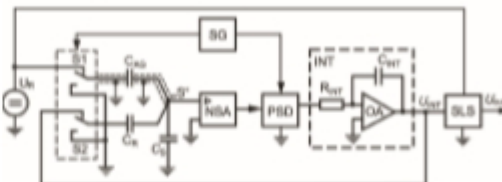


Рисунок 3 – Блок-схема преобразователя электрической ёмкости датчика воздушного зазора в постоянное напряжение: U_R – источник опорного напряжения; $S1, S2$ – коммутаторы; SG – коммутационный генератор; C_{AG} – ёмкостный сенсор воздушного зазора в гидрогенераторе; C_R – образцовый конденсатор; NSA – усилитель сигнала неравновесия; C_s – паразитная шунтирующая ёмкость; PSD – фазочувствительный детектор; INT – интегратор; R_{INT} – резистор интегратора; C_{INT} – конденсатор интегратора; SLS – схема линейного масштабирования

Figure 3 – Block diagram of the converter for the electrical capacitance of the air gap sensor to direct voltage: U_R – reference voltage source; $S1, S2$ – switches; SG – switching generator; C_{AG} – capacitive air gap sensor in hydro generator; C_R – reference capacitor; NSA – nonequilibrium signal amplifier; C_s – parasitic shunt capacitance; PSD – phase sensitive detector; INT – integrator; R_{INT} – integrator resistor; C_{INT} – integrator capacitor; SLS – linear scaling scheme

В предложенном измерителе стабилизированное постоянное напряжение U_R опорного источника U_R с помощью коммутатора $S1$ преобразуется в прямоугольное напряжение (меандр) с частотой f_{SG} (75–80 кГц) коммутационного генератора SG . Напряжение меандра с амплитудой, равной U_R , подаётся на сенсор воздушного зазора C_{AG} , ёмкость которого является одним из плеч схемы сравнения. Другое плечо схемы сравнения – образцовый конденсатор C_R , на который с выхода интегратора INT через другой коммутатор $S2$ подаётся прямоугольное напряжение амплитудой U_{INT} . Ток, протекающий через ёмкость сенсора C_{AG} , в точке «5» на входе усилителя сигнала неравновесия NSA суммируется с током, протекающим через ёмкость образцового конденсатора C_R . К этой же точке «5» подключена шунтирующая ёмкость C_s , которая является паразитной

ёмкостью между центральной жилой подводящего экранированного провода сенсора C_{AG} и землёю. Входное сопротивление NSA приближается по характеру к ёмкостному, поэтому делитель из элементов C_S , C_R и C_S передаёт меандр напряжения без искажений, а сигнал неравновесия в точке «5» либо синфазен, либо противофазен сигналу управления коммутаторами $S1$ и $S2$. Работа этих коммутаторов и полярности напряжений U_R и U_{INT} согласованы так, что токи через конденсаторы C_{AG} и C_R находятся в противофазе друг с другом и благодаря этому взаимно вычитаются. При определённом соотношении ёмкостей и напряжений суммарный ток обращается в ноль, при этом в точке «5» (на входе NSA) переменная составляющая с частотой f_{SG} отсутствует. Нетрудно видеть, что это соотношение выражается формулой:

$$\frac{U_{INT}}{U_R} = \frac{C_{AG}}{C_R}, \quad (2)$$

откуда

$$C_{AG} = \frac{U_{INT}}{U_R} C_R. \quad (3)$$

При нарушении соотношения (2) возникает сигнал неравновесия, который после прохождения через усилитель NSA поступает на фазочувствительный детектор PSD . Опорные напряжения PSD синхронны и синфазны с напряжениями коммутации ключей $S1$ и $S2$, они поступают от того же коммутационного генератора SG , который управляет работой ключей. Выходное напряжение детектора PSD содержит постоянную составляющую, знак которой зависит от направления отклонения схемы от состояния равновесия, а величина – от степени этого отклонения. К выходу PSD подключён интегратор INT , состоящий из резистора R_{INT} , конденсатора C_{INT} и операционного усилителя OA . Напряжение U_{INT} на выходе интегратора является выходным сигналом схемы, оно пропорционально измеряемой ёмкости сенсора C_{AG} (см. выражение (3)). Далее оно поступает на схему линейного масштабирования SLS , где нормируется для приведения к требуемому диапазону изменения, т. е. когда $C_{AG} = 0$, то $U_{OUT} = 0$, а когда $C_{AG} = C_{AGmax}$, то $U_{OUT} = 10$ В.

На рисунке 4 показаны эюры напряжений, действующих в схеме.

При равновесии:

$$U_{INT} = U_R \frac{C_{AG}}{C_R}. \quad (4)$$

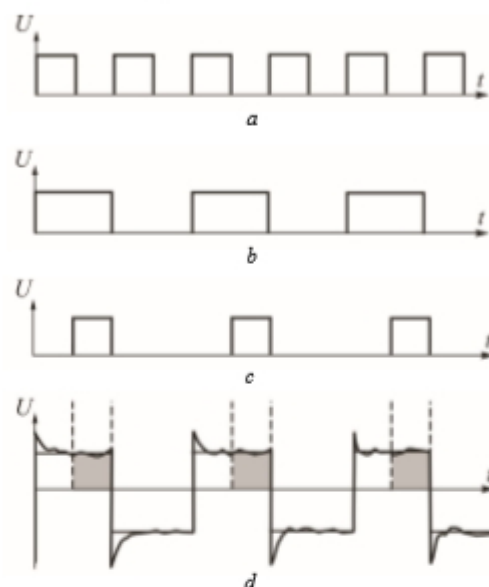


Рисунок 4 – Эюры напряжений, действующих в преобразователе: а – напряжение задающего генератора в схеме коммутационного генератора SG ; б – напряжение, подаваемое на входы управления коммутаторов $S1$ и $S2$; в – сигнал управления ключами PSD ; д – условный сигнал неравновесия на выходе NSA

Figure 4 – Electrical voltage diagrams acting in the converter: а – the voltage of the driver oscillator in the switching generator SG circuit; б – voltage at the control inputs of the switches $S1$ and $S2$; в – the key control signal PSD ; д – conditional output disequilibrium signal NSA

Если учесть, что в схеме линейного масштабирования U_{INT} преобразуется в U_{OUT} пропорционально коэффициенту k , то на выходе схемы будет постоянное напряжение, равное:

$$U_{INT} = kU_{INT} = kU_R \frac{C_{AG}}{C_R}. \quad (5)$$

В моменты срабатывания коммутаторов $S1$ и $S2$ на входе NSA возникают импульсы коммутационной помехи, которые вызывают в усилителе значительные переходные процессы. С целью уменьшения влияния этих процессов на работу устройства, в PSD используется не весь сигнал неравновесия, а только вторая половина каждого его полупериода (выделено затемненным фоном), свободная от коммутационной

помехи, т. е. реализуется метод весовой функции. Для упрощения на эпюрах показаны только сигналы прямого действия, хотя в схеме сформированы также еще и инверсные к ним напряжения (детектирование в PSD двухполупериодное).

На основе блок-схемы разработана принципиальная электрическая схема преобразователя и изготовлен экспериментальный образец измерителя воздушного зазора в капсульном ГТ типа СТК 538/160-70М. Проведенные лабораторные испытания образца подтвердили его работоспособность и основные характеристики. Испытания образца (в том числе и на быстродействие) были проведены на специально разработанном стенде.

Следует отметить, что предложенный в работе преобразователь может быть использован и с емкостным сенсором радиального биения цилиндрических поверхностей валов гидроагрегатов, который описан в работе [21].

Заключение

Разработан вторичный измерительный преобразователь для емкостного сенсора, образованного компланарными параллельными электродами и предназначенного для измерения воздушного зазора между статором и ротором в мощных гидрогенераторах.

Преобразователь обеспечивает погрешность измерения рабочей емкости сенсора зазора не более, чем 0,2–0,5 % и быстродействие в несколько тысяч измерений в секунду. Это даёт возможность измерять воздушный зазор между статором и ротором в мощных гидрогенераторах любого типа в динамическом режиме, т. е. при рабочей скорости вращения машин.

Список использованных источников

1. Алексеев, Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – 2-е изд., стер. / Б.А. Алексеев – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 144 с.
2. Левицкий, А.С. Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів / А.С. Левицкий, Г.М. Федоренко, О.П. Грубой. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.
3. Cerpinska, M. Dynamic air gap change of low-speed generator considering thermal expansion, centrifugal force and magnetic force effects / M. Cerpinska, R. Elmanis-Helmanis // Latvian journal of physics and technical sciences. – 2017. – No. 5. – P. 26–37. DOI: 10.1515/lpts-2017-0031

4. Adamowski, J.C. Ultrasonic dynamic air-gap monitoring system for large hydro-generators / J.C. Adamowski [et al.] // In IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013, Prague, Czech Republic. 21–25 July 2013. – P. 1311–1314. DOI: 10.1109/ULTSYM.2013.0335

5. Kokoko, O. Analysis of air-gap influence on a large hydro generator's parameters using sud-den symmetrical short-circuit test / O. Kokoko [et al.] // In 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 10–13 May 2015. – P. 102–107. DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409044

6. VM™46.1 Capacitive Air Gap Measuring Chains. User's Manual. VibroSystM, Canada, 2017, 12 p.

7. 4000 Series Air Gap Sensor System Datasheet Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. BentlyNevada, Nevada USA, 2019, 18 p.

8. Iris power capacitive air gap sensors. Iris Power, Canada, 2016, 4 p.

9. Air Gap Measuring System LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. Vibro-Meter SA, Switzerland, 2012, 4 p.

10. Левицкий, А.С. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СТК 538/160-70М / А.С. Левицкий, Є.О. Зайцев, Б.А. Кромплас // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук. – 2016. – № 43. – С. 134–136.

11. Джежора, А.А. Электроёмкостные преобразователи и методы их расчета / А.А. Джежора. – Минск: Белорусская наука. – 2008. – 305 с.

12. Xiaohui, H. Planar capacitive sensors – designs and applications / H. Xiaohui, Y. Wuqiang // Sensor Review. – 2010. – No. 30(1). – P. 24–39. DOI: 10.1108/02602281011010772

13. Mamishev, A.V. Interdigital Sensors and Transducers / A.V. Mamishev [et al.] // Proceeding of the IEEE. – 2004. – Vol. 92, no. 5. – P. 808–845. DOI: 10.1109/JPROC.2004.826603

14. Yonggang, H. Analysis of a concentric coplanar capacitor for epidermal hydration sensing. Sensors and Actuators / H. Yonggang [et al.] // A203: Physical. – 2013. – P. 149–153. DOI: 10.1016/j.sna.2013.08.037

15. Amr, N.A. Improved interdigital sensors for structural health monitoring of composite retrofit systems / N.A. Amr, W. Wael // Journal of Reinforced Plastics and Composite. – 2011. – No. 30(7). – P. 621–629. DOI: 10.1177/0731684411399944

16. Chen, T. Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures / T. Chen. – Iowa: Iowa State University. – 2012. – 204 p.

17. Sheiretov, Y. Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric / Y. Sheiretov, M. Zahn //

IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2005. – Vol. 12, no. 5. – P. 993–1004.

DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522192

18. Xiaobei, Li. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors / Li. Xiaobei [et al.] // IEEE Sensors journal. – 2006. – Vol. 6, no. 2. – P. 434–440. DOI: 10.1109/JSEN.2006.870161

19. Chen, T. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation of multilayered dielectric structures / T. Chen, N. Bowler // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2010. – Vol. 17, no. 4. – P. 1307–1318.

DOI: 10.1109/TDEI.2010.5539703

20. Новик, А.И. Особенности построения измерительных цепей для работы с ёмкостными датчиками / А.И. Новик [и др.] // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 66–70.

21. Zaitsev, Ie.O. Research of a Capacitive Distance Sensor to Grounded Surface / Ie.O. Zaitsev [et al.] // Telecommunications and Radio Engineering. – 2019. – Vol. 78, no. 2. – P. 173–180.

DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80

References

1. Alekseev B.A. *Opredelenie sostoyaniya (diagnostika) krupnykh gidrogeneratorov* [Determining the status (diagnostics) of large hydro generators]. ENAS, 2002, 144 p.

2. Levytskyi A.S., Fedorenko G.M., Gruboj O.P. *Kontrol stanu potuzhnykh hidro- ta turbogeneratoriv za dopomohoyu yemnistnykh vymiruyuvachiv parametriv mekhanichnykh defektiv* [Monitoring of the status of powerful hydro and turbo generators using capacitive meter for the parameters of mechanical defects]. IED NANU Publ., 2011, 242 p.

3. Cerpinska M., Elmanis-Helmanis R. Dynamic air gap chance of low-speed generator considering thermal expansion, centrifugal force and magnetic force effects. *Latvian journal of physics and technical sciences*, 2017, no. 5, pp. 26–37. DOI: 10.1515/lpts-2017-0031

4. Adamowski J.C., Souza A.T., Perez N., Lima A.A., Oda P.D., Tiba H.H. Ultrasonic dynamic air-gap monitoring system for large hydro-generators. In *IEEE Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium*, 2013, Prague, Czech Republic, 21–25 July 2013, pp. 1311–1314. DOI: 10.1109/ULTSYM.2013.0335

5. Kokoko O., Merkhoul A., Tounzi A., Al-Haddad K., Guillot E. Analysis of air-gap influence on a large hydro generator's parameters using sudden symmetrical short-circuit test. In *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 10–13 May 2015, pp. 102–107.

DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409044

6. VMTM6.1 Capacitive Air Gap Measuring Chains. User's Manual. VibroSystM, Canada, 2017, 12 p.

7. 4000 Series Air Gap Sensor System Datasheet Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. BentlyNevada, Nevada USA, 2019, 18 p.

8. Iris power capacitive air gap sensors. Iris Power, Canada, 2016, 4 p.

9. Air Gap Measuring System LS 120-121 Transducers & ILS 730-731 Conditioners. Vibro-Meter SA, Switzerland, 2012, 4 p.

10. Levytskyi A.S., Zaitsev I.O., Kromplyas B.A. *Viznachennya funktsiyi peretvorenniya Emniznogo sensora povitryanogo zazoru v gidrogeneratori SGK 538/160-70M* [Determination of the response characteristic of the capacitive sensor of the air gap in the hydrogenerator SGK 538/160-70M]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2016, no. 43, pp. 134–137 (in Ukrainian).

11. Jezzora A.A. *Elektroemkostnye preobrazovateli i metody ikh rascheta* [Electrocapacitance Transducers and Methods of Their Calculation]. Minsk: Bel. Nauka Publ., 2007, 305 p.

12. Xiaohui H., Wuqiang Y. Planar capacitive sensors – designs and applications. *Sensor Review*, 2010, no. 30(1), pp. 24–39. DOI: 10.1108/02602281011010772

13. Mamishev A.V., Sundara-Rajan K., Yang F., Du Y., Zahn M. Interdigital Sensors and Transducers. *Proceeding of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 5, pp. 808–845. DOI: 10.1109/JPROC.2004.826603

14. Cheng H., Yihui Z., Xian H., John A.R., Yonggang H. Analysis of a concentric coplanar capacitor for epidermal hydration sensing. *Sensors and Actuators A203: Physical*, 2013, pp. 149–153. DOI: 10.1016/j.sna.2013.08.037

15. Amr N.A., Wael W. Improved interdigital sensors for structural health monitoring of composite retrofit systems. *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, 2011, no. 30(7), pp. 621–629. DOI: 10.1177/0731684411399944

16. Chen T. Capacitive sensors for measuring complex permittivity of planar and cylindrical structures. *Iowa State University*, 2012, 204 p.

17. Sheiretov Y., Zahn M. Modeling of Spatially Periodic Dielectric Sensors in the Presence of a Top Ground Plane Bounding the Test Dielectric. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005, vol. 12, no. 5, pp. 993–1004. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1522192

18. Xiaobei Li, Larson S., Zyuzin A., Mamishev A.V. Design Principles for Multichannel Fringing Electric Field Sensors. *IEEE Sensors journal*, 2006, vol. 6, no. 2, pp. 434–440. DOI: 10.1109/JSEN.2006.870161

19. Chen T., Bowler N. Analysis of a concentric coplanar capacitive sensor for nondestructive evaluation

of multilayered dielectric structures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 1307–1318.

DOI: 10.1109/TDEI.2010.5539703

20. Novik A.I., Kolupaev Yu.P., Nuzhnenko V.V., Stadnik A.V. *Osobennosti postroyeniya izmeritelnykh tspey dlya raboty s emkostnyimi datchikami* [Features of construction of meter circuits for use with capacitive

sensors]. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2005, no. 1, pp. 66–70 (in Russian).

21. Zaitsev Ie.O., Levytskyi A.S., Novik A.I., Berezhnychenko V.O., Smyrnova A.M. Research of a Capacitive Distance Sensor to Grounded Surface. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 173–180.

DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.80

ДОДАТОК В

Стаття прийнята до збірнику тез 7-ї міжнародної науково-технічної конференції
«Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния
объектов» 2020 року

УДК 621.3

АДАПТИВНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОЩНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

*Е. А. ЗАЙЦЕВ, А. С. ЛЕВИЦКИЙ, В. А. БЕРЕЗНИЧЕНКО,
А. Е. СУХОРУКОВА*

Институт электродинамики НАН Украины
Киев, Украина

UDC 621.3

ADAPTIVE INFORMATION-MEASURING CONTROL SYSTEM POWERFUL HYDROGENERATORS MECHANICAL CONDITION

*I. O. ZAITSEV, A. S. LEVYTSKYI, V. O. BEREZNYCHENKO,
O. E. SUKHORUKOVA*

Аннотация. Представлены результаты разработки, испытаний и применения информационно-измерительной системы, предназначенной для контроля механического состояния мощных гидрогенераторов. Особенностью разработанной системы является использование алгоритмов квазиоптимальной фильтрации данных. Для реализации алгоритма используется информация с дополнительных датчиков, что позволяет компенсировать воздействие внешних и внутренних факторов на результат измерения. Представлены полученные характеристики разработанной системы при её испытании на испытательно-демонстрационном стенде.

Ключевые слова: гидрогенератор, емкостный датчик, воздушный зазор, система, информационно-измерительная система, мониторинг, контроль, механические дефекты.

Abstract. In this paper was presented results of the development, testing and application of an information-measuring system designed to control the mechanical state of powerful hydrogenerators. A feature of the developed system is the use of algorithms for quasi-optimal data filtering. To implement the algorithm, information from additional sensors is used, which makes it possible to compensate for the influence of external and internal factors on the measurement result. The obtained characteristics of the developed system are presented during its testing at the test-demonstration stand.

Key words: hydrogenerator, capacitive sensor, air gap, system, information-measuring system, monitoring, control, mechanical defects.

Введение

В электроэнергетике большинства стран постсоветского пространства изношенность мощного электрооборудования (ЭО) достигает 80 %, поэтому чрезвычайно важным есть оценка его фактического технического состояния. Причем из-за длительной безостановочной эксплуатации ЭО требуется непрерывный контроль и/или мониторинг за изменением его эксплуатационных характеристик [1]. В свою очередь, как указывалось в [2], 24 % всех неисправностей связаны с механическими дефектами

машины, которые непосредственно влияют на эксплуатационные характеристики ЭО.

Для решения задачи непрерывного контроля и/или мониторинга в настоящее время используются различные средства измерения механического состояния гидрогенераторов (ГГ), которые по ряду причин не удовлетворяют современным требованиям к системам проведения непрерывного контроля и мониторинга состояния сложных и дорогостоящих ГГ в ходе их эксплуатации, а именно:

- морально устарели и не отвечают требованиям, которые регламентируются государственными и международными стандартами [3–5];
- требуют значительной адаптации к техническим характеристикам ГГ и условиям эксплуатации информационно-измерительных каналов системы технической диагностики ГГ.

Актуальность исследований

Перечисленные проблемы в значительной степени определяют необходимость разработки специализированных средств измерения параметров механических дефектов с учетом технических характеристик эксплуатируемых на постсоветском пространстве ГГ, значительная часть которых спроектирована и выпущена в эксплуатацию коллективами заводов ГП «Электротяжмаш» (г. Харьков, Украина), «Завод «Электросила» (г. Санкт-Петербург, РФ), НПО «ЭЛСИБ» (г. Новосибирск, РФ) и др.

Учитывая, что одним из основных параметров мощных ГГ является воздушный зазор между статором и ротором машины, в котором механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию, актуальна разработка системы контроля механических параметров мощных гидрогенераторов.

Результаты исследований

В Институте электродинамики НАН Украины авторами предложена информационно-измерительная система контроля механических параметров мощных ГГ, для которой разработаны, изготовлены и испытаны образцы специализированных датчиков, измерительных каналов и программного обеспечения, входящих в состав системы. Разработанная система позволяет контролировать параметры: воздушного зазора от двух до 24-х точек в зависимости от типа ГГ; скорость вращения ротора; параметры вибраций вблизи точки установки датчика воздушного зазора (при необходимости); параметры теплового поля; напряженности переменного магнитного поля. Практическая отработка элементов программно-аппаратного комплекса с целью исследования возможностей контроля и мониторинга технического состояния ГГ при различных режимах работы

проводилась на разработанном масштабном испытательно-демонстрационном стенде (рис. 1).

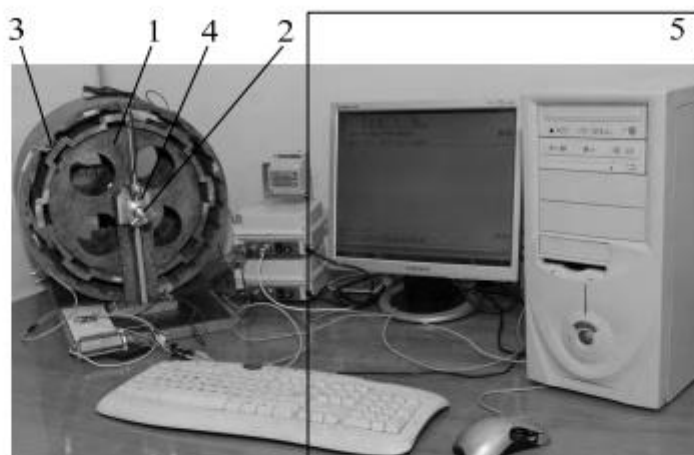


Рис. 1. Общий вид испытательно-демонстрационного стенда: 1 – макет генератора; 2 – вал; 3 – датчики воздушного зазора, температуры и теплового поля; 4 – датчик метки вала; 5 – система контроля механических параметров

Практическая разработка и наладка работы измерительных каналов системы осуществлялась с учетом характеристик капсульного гидрогенератора СГК638-160/70М, эксплуатируемого на Киевской и Каневской ГЭС. Система имеет четыре идентичных измерительных канала со следующими характеристиками:

- диапазон измерения значения воздушного зазора от 2 до 10 мм;
- нечувствительность к воздействию магнитного поля в пределах до 0,68 Т;
- диапазон рабочих температур от -40 до +125 °С;
- погрешность измерения воздушного зазора с учётом программного алгоритма адаптивного подавления неинформативных параметров не более 1 %.

Проведенные исследования емкостного датчика воздушного зазора с планарным размещением электродов представлены в [6–10].

Особенностью системы является то, что её работа основана на использовании алгоритмов квазиоптимальной фильтрации данных. Такой подход позволяет обеспечить точность определения значения воздушного зазора в динамическом или статическом режиме эксплуатации ГГ, а также характеристики, которые могут быть получены как производные с учетом пространственно-временной привязки полученных данных (годограф [11], эксцентриситет [12], форма ротора и статора [9, 13] и т. д.). Для реализации

алгоритма была разработана блочно-модульная архитектура системы (рис. 2), что позволяет обеспечить гибкость, взаимозаменяемость и возможность адаптации системы под различные типы ГТ.

Система состоит из измерительного модуля (количество модулей варьирует в зависимости от типа ГТ), датчика метки вала 6, коммутатора 7, рабочей станции 8, содержащей в себе операционную систему 9, специализированное программное обеспечение обработки данных 10 и базу данных 11. Для удобства работы оператора 12 рабочая станция может быть дополнена программным обеспечением для визуализации данных с интерфейсом типа Human Machine Interface.

Измерительный модуль состоит из измерителя воздушного зазора 5, который содержит емкостный датчик воздушного зазора 1 и датчик температуры 2, а также модуль имеет датчик напряженности переменного магнитного поля 3 и микроконтроллер 4.

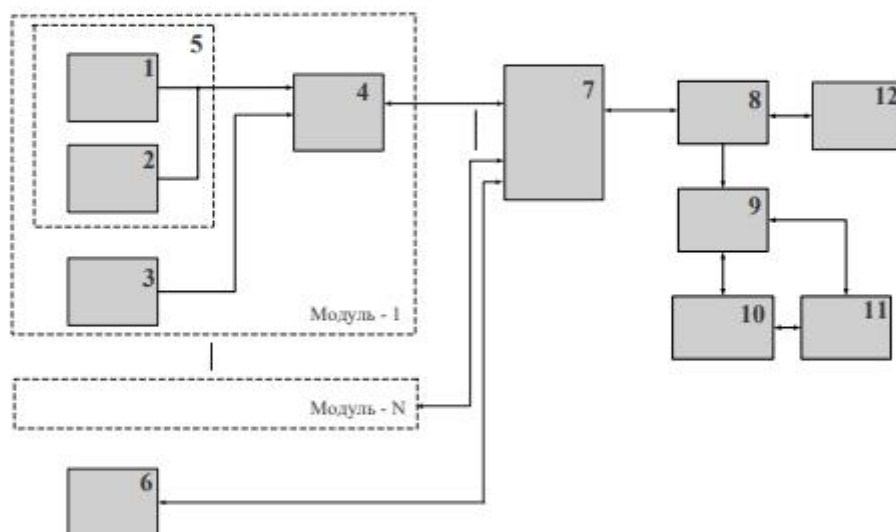


Рис. 2. Блочно-модульная архитектура системы

Рассмотрим более детально работу элементов системы. В динамике для точного определения значения воздушного зазора над каждым из полюсов система использует дополнительные компоненты, среди них основными являются датчик метки вала 6 и датчик напряженности переменного магнитного поля 3. Датчики используются для синхронизации работы системы контроля и диагностики воздушного зазора с другими системами технической диагностики мощных генераторов, а также для пространственной привязки полученных данных к полюсам. Другим вариантом является использование сигнала с емкостного сенсора в качестве генератора

метки полюса вала. В этом случае в схему (см. рис. 2) дополнительно включается компаратор. На один из входов компаратора подается выходное напряжение вторичного измерительного преобразователя, на другой вход – предельно установленное напряжение с опорного источника питания. Когда на входе компаратора напряжения становятся равными, на выходе компаратора формируется логическая единица, которая запускает аналого-цифровой преобразователь, содержащийся в микроконтроллере 4, предназначенный для формирования цифровых отсчетов о значении воздушного зазора [14].

На генераторах, работающих в маневренных режимах или когда использование собственного синусоидального напряжения невозможно (например, при отсутствии возбуждения ротора, когда в обмотках статора практически отсутствует напряжение), как генератор метки полюса вала используется сенсор метки вала. В этом случае частота его импульсов в n раз меньше частоты следования полюсов возле емкостного датчика воздушного зазора. Для формирования сигнала необходимой частоты, жестко привязанного по фазе к временному положению метки вала, может быть применен известный принцип фазовой автоподстройки частоты.

Для компенсации погрешности от воздействия на результат измерения вихревых токов, создаваемых на поверхности датчика воздушного зазора тангенциальной составляющей переменного магнитного поля, используется датчик напряженности переменного магнитного поля, который в опытном образце был выполнен в виде витка катушки и размещен непосредственно возле датчика воздушного зазора. Также дополнительно с целью минимизации погрешности от воздействия внешних факторов на результат измерения воздушного зазора могут использоваться вибродатчики, устраняющие погрешности, которые обусловлены вибрациями статора относительно ротора.

Использование полученных таким образом данных позволит:

- повысить надежность работы и эксплуатации ГГ;
- повысить точность определения и анализа причин, вызывающих появление дефектов [9, 15–17];
- обеспечить выполнение норм, заложенных в стандарте документа ISO 20816-5 «Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pump-storage plants», который разрабатывается на замену действующему сегодня стандарту ISO 7919-5:2005 [3].

Основным отличием нового стандарта от существующего является требование в отслеживании тренда изменения амплитуды и фазы измеряемых сигналов во времени. Использование тренда как информационного параметра позволяет контролировать изменение состояния ЭО, в том числе и ГГ в низкочастотной полосе, что невозможно при применении штатных средств контроля – акселерометров.

Заклучение

Испытания лабораторного образца разработанной информационно-измерительной системы контроля механического состояния мощных гидрогенераторов показали высокую эффективность применения разработанного экспериментального образца и его возможность использования в составе комплекса средств технической диагностики ГГ. Использование предлагаемой системы позволяет существенно уменьшить трудоемкость выполнения операций контроля фактического технического состояния ГГ посредством измерения воздушного зазора на остановленном ГГ, а также в различных режимах его эксплуатации, что в свою очередь повысит надежность работы и эксплуатации генерирующего оборудования гидроэлектростанций стран постсоветского пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. Кн. 2: Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – Москва: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. Insulation Failure Mechanisms of Power Generators / R. Brutsch [et al.] // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2008. – № 24 (4). – С. 17–25.
3. ISO 7919-5:2005. Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts – Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants.
4. ДСТУ ISO 7919-5:2014. Вібрація механічна. Оцінювання стану машин за результатами вимірювання вібрації на обертових валах. Ч. 5: Агрегати гідроелектростанцій та насосних станцій (ISO 7919-5:2005, IDT). – [Чинний від 2015-07-01]. – 2016. – 15 с.
5. ISO 10817-1: 1998 (E). Rotation shaft vibration measuring systems. – Part 1: Relative and absolute sensing of radial vibration.
6. Зайцев, Є. О. Експериментально-теоретичні дослідження ємнісного сенсора повітряного зазору для гідрогенераторів методами регресійного аналізу / Є. О. Зайцев, А. С. Левицький // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 2. – С. 35–40.
7. Розробка апаратно-програмного забезпечення системи контролю повітряного зазору гідрогенераторів / Є. О. Зайцев [и др.] // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. – № 24 (100). – С. 151–161.
8. Zaitsev, Ie. O. Characteristic of capacitive sensor for the air gap control system in the hydrogenator / Ie. O. Zaitsev, A. S. Levytskyi, B. A. Kromplyas // First Ukraine Conference On Electrical And Computer Engineering (UKRCON): Proceedings of the 2017 IEEE, May 29 – June 2 2017 Kiev. – 2017. – P. 390–394.

9. **Зайцев, Е. А.** Система контроля воздушного зазора гидрогенераторов / Е. А. Зайцев, А. С. Левицкий, В. Е. Сидорчук // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 8 (2). – С. 122–130.

10. **Zaitsev, Ie.** Hybrid electro-optic capacitive sensors for the fault diagnostic system of power hydrogenerator. Clean Generators – Advances in Modeling of Hydro and Wind Generators / Ie. Zaitsev, A. Levytskyi // Intechopen. – 2020. – P. 25–42.

11. **Левицкий, А. С.** Спосіб визначення деяких механічних дефектів потужних генераторів за результатами вимірювання повітряного зазору / А. С. Левицкий, Є. О. Зайцев, С. А. Закусило // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси ПРТК-2018: тези доповіді X Міжнар. наук.-практ. конф. 22–23 травня 2018 м. – Київ: НАУ, 2018. – С. 111–113.

12. **Зайцев, Є. О.** Програмно-математичне забезпечення систем ідентифікації ексцентриситету ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев // Гідроенергетика України. – 2018. – № 3–4. – С. 50–56.

13. **Зайцев, Є. О.** Аналітичне визначення геометричних параметрів обвідної полюсів ротора гідро-генератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев, А. С. Левицкий // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2018. – № 50. – С. 62–70.

14. **Левицкий, А. С.** Контроль стану потужних гідро- та турбогенераторів за допомогою ємнісних вимірювачів параметрів механічних дефектів: монографія / А. С. Левицкий, Г. М. Федоренко, О. П. Грубой. – Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2011. – 242 с.

15. **Зайцев, Є. О.** Комп'ютеризована система контролю механічних параметрів електрообладнання / Є. О. Зайцев // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016): матеріали XIII Міжнар. конф., 3–6 жовтня 2016 р. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – С. 116–118.

16. **Зайцев, Є. О.** Програмно-математичне забезпечення систем ідентифікації ексцентриситету ротора гідрогенератора за даними сенсорів повітряного зазору / Є. О. Зайцев // Гідроенергетика України. – 2018. – № 3–4. – С. 50–56.

17. **Муравлев, О. П.** Определение неравномерности воздушного зазора в асинхронных двигателях по данным ОТК о числе задеваний ротора за статор / О. П. Муравлев, Э. К. Стрельбицкий // Изв. Томского политехн. ин-та [Известия ТПИ]. – 1966. – Т. 145. – С. 121–127.

E-mail авторів: zaitsev@i.ua.

ДОДАТОК Г

Стаття прийнята до збірника матеріалів XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» 2020 року

МАТЕРІАЛИ XXI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ
"ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ"
Розділ 4. Гідроенергетика

УДК 681.786

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СЕНСОРУ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ В ПОТУЖНИХ ГІДРОГЕНЕРАТОРАХ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Є.О. Зайцев, канд.техн.наук, **О.Є. Сухорукова**, інженер
Інститут електродинаміки НАН України,
проспект Перемоги, 56, 03057, Київ, Україна

В доповіді розглядається вирішення задачі створення моделі ємнісного компланарного двоелектродного сенсору повітряного зазору між ротором та статором в потужних гідрогенераторах. Модель використовується для вивчення картини електричного поля в зазначеному сенсорі, а також визначення функції перетворення «повітряний зазор - електрична ємність сенсора».

Ключові слова: гідрогенератор, ротор, статор, повітряний зазор, модель сенсору.

ANALYSIS OF CAPACITIVE AIR GAP SENSOR MODELS FOR POWERFUL HYDROGENERATORS USING COMPUTER MODELING

I.O.Zaitsev, O.E. Sukhorukova,
The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine
56 Peremohy Ave., 03680, Kyiv, Ukraine

In the report the deals with the solution of the problem of creating a model of capacitive coplanar two-electrode sensor of the air gap between the rotor and the stator of powerful hydrogenerators. The model is used to study the picture its

equipotential electric field, as well as to determine the conversion function "air gap - electrical sensor capacity".

Keywords: *hydrogenerator, rotor, stator, air gap, sensor model.*

ORCID: 0000-0003-3303-471X.

Актуальною проблемою для об'єднаної енергетичної системи України є забезпечення надійного та безпечного функціонування потужних генераторів ГЕС та ГАЕС, що викликано насамперед можливістю їх використання для покриття дефіциту потужності добового графіку навантаження енергосистеми в пікові години. Вирішення цієї складної і відповідальної проблеми можливо реалізувати або за рахунок встановлення нових гідрогенераторів, або і проведення діагностування стану працюючих машин, спрацьованість яких на сьогодні становить понад 80% [1]. При цьому, діагностування функціонального стану і прогнозування залишкового ресурсу будь-якого обладнання, в тому числі і гідрогенераторів, неможливо провести без застосування нових методів і засобів отримання вимірювальної інформації, в тому числі сенсорів. Від повноти і достовірності одержуваної з них інформації залежить своєчасність виявлення дефектів машин та прийняття рішення з їх ліквідації. У зв'язку з цим в Інституті електродинаміки НАН України був розроблений ємнісний сенсор повітряного зазору [3] з системою компланарних паралельних електродів (рис. 1). Принцип дії зазначених ємнісних сенсорів полягає у прямопропорційній залежності ємності від величини повітряного зазору. В роботі [4] описано аналітичний метод визначення функції

перетворення ємнісного сенсора такого типу та визначено його оптимальні геометричні розміри в залежності від діапазону вимірювання і умов розташування на зубці осердя статора ГГ типу СГГ538/160-70М. Враховано, що при цьому розміри сенсора мають бути не більшими, ніж 30 мм по ширині, 220 мм по довжині і 1,5 мм по товщині.

Проведені розрахунки є громіздкими та придатні тільки для визначення деяких характеристик конфігурацій. Щоб охарактеризувати метрологічні характеристики сенсора доцільним є проведення аналізу на основі числових методів, використовуючи можливості комп'ютерного моделювання, яке в більшості випадків засноване на методі скінченних елементів.

Тому дана робота присвячені питанню створення моделі ємнісного сенсору повітряного зазору та дослідженню його електричного поля методами комп'ютерного моделювання.

Для вирішення задачі реалізації моделі було використано програмний пакет "Comsol multiphysics", що використовує метод скінченних елементів при вирішенні задач мультифізичного моделювання. Загальна процедура вирішення задачі розбита на декілька етапів:

1) підготовка моделі (рис.1), яка включає завдання та вибір параметрів матеріалів для електродів, діелектричної підкладки та екрана;

2) визначення граничних умов, яке включає завдання та вибір значення початкових потенціалів на електродах;

3) розрахунок загальної ємності сенсора за допомогою створеної скінченно-елементної моделі конструкції ємнісного сенсора повітряного зазору;

4) аналіз отриманих результатів.

Розроблену модель ємнісного сенсора з компланарними паралельними електродами та отриманий розподіл електричного потенціалу показано на рис. 1, на якому: 1 – високопотенційний електрод; 2 – низькопотенційний електрод; 3 – низькопотенційний охоронний електрод; 4 – діелектрична підкладка; 5 – екрануюча підкладка.

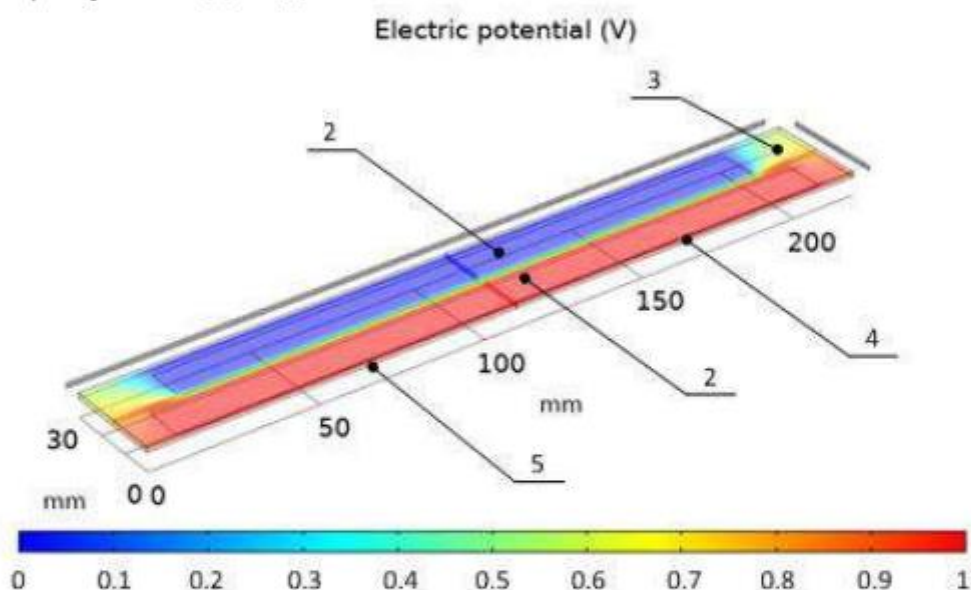


Рис. 1 Модель ємнісного сенсора.

Використовуючи розроблену модель (рис.1), був розрахований розподіл потенціалів електричного поля ємнісного сенсора. Було підтверджено, що розподіл потенціалів електричного поля уздовж меншого за довжиною електрода сенсора (низько потенціального) можна вважати квазістаціонарним. Це підтвердило зроблені в [3] аналітичні розрахунки та висновки, щодо зменшення впливу крайових ефектів на точність вимірювання зазору.

Розподіл еквіпотенціального електричного поля моделі в середній області поперечного перерізу моделі та на торцях електродів приведено на рисунках 2-3.

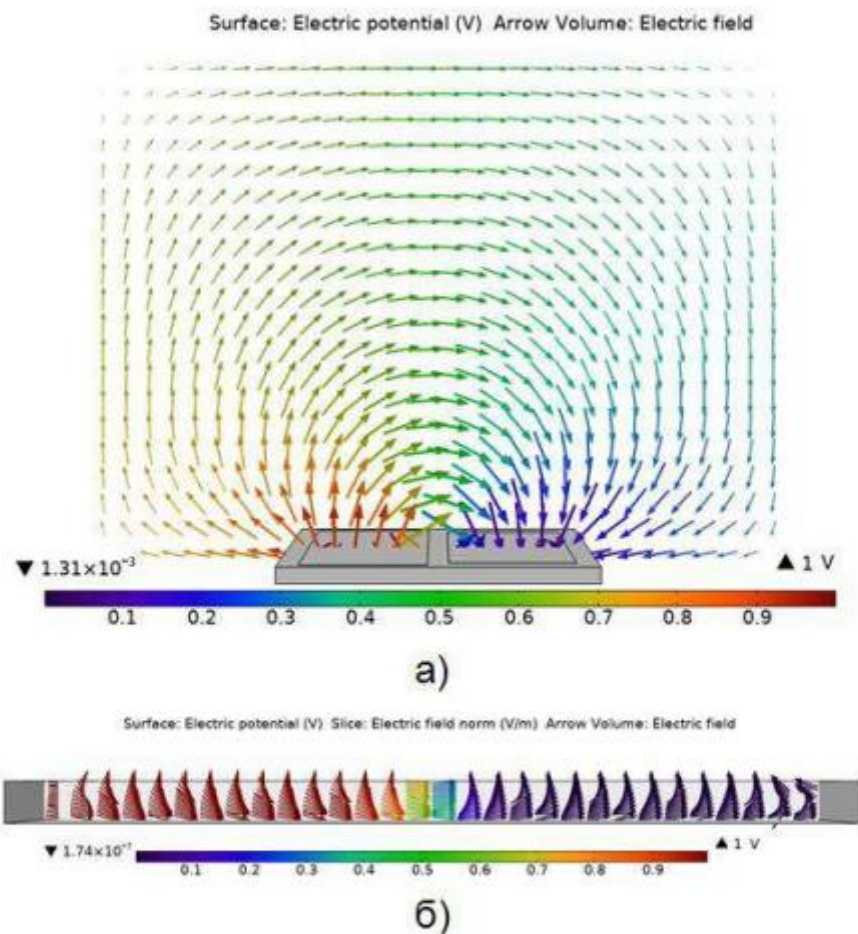


Рис. 2. Розподіл еквіпотенціального електричного поля моделі в середній області поперечного перерізу моделі: а - вид зовнішніх силових ліній, б – внутрішні силові лінії моделі.

Отримані результати відображають необхідність врахування розподілу електричного поля в торцевих зонах сенсора, для оптимізації його конструкції з ціллю

зменшення впливу "крайових ефектів" на результат визначення значення повітряного зазору між ротором та статором гідрогенератора.

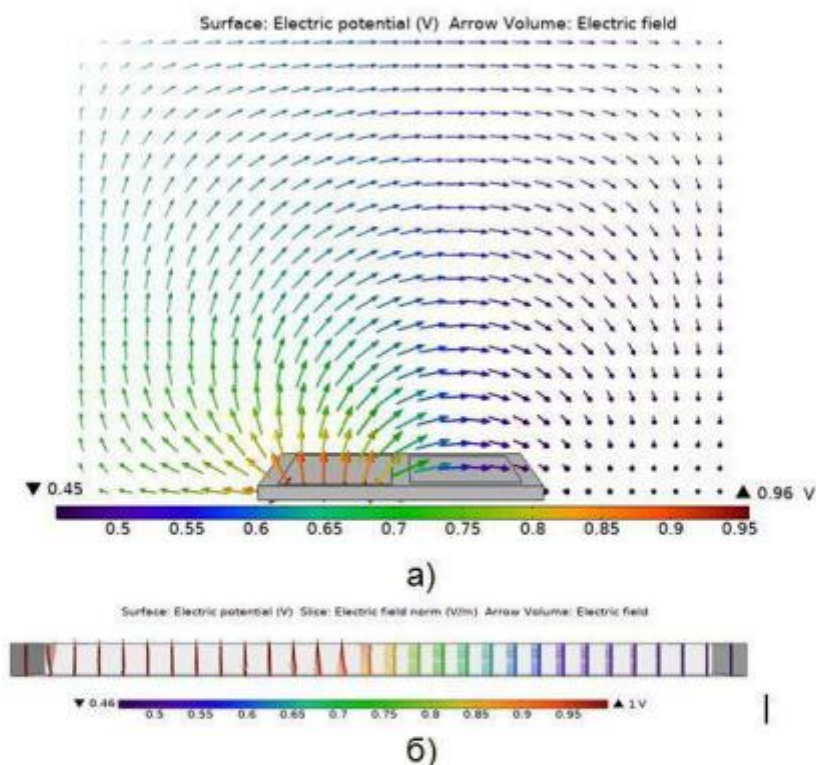


Рис. 3. Розподіл еквіпотенціального електричного поля моделі на торці в електрода поперечного перерізу моделі: а - вид зовнішніх силових ліній, б – внутрішні силові лінії моделі.

Висновок: Використання метод скінченних елементів та створену скінченно-елементну модель конструкції ємнісного сенсора повітряного зазору дозволило визначити та дослідити конфігурацію еквіпотенціального

електричного поля сенсора та розподіл його потенціалів в сенсорі.

Отримані результати підтвердили, що розподіл потенціалів електричного поля уздовж низько потенціального електрода сенсора можна вважати квазістаціонарним.

Література:

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. 2-е изд., стер. Москва: НЦ ЭНАС, 2002. 144 с.
- 3 Патент України на винахід № 115924 МПК G01 B7/14, G01D 5/24. Ємнісний сенсор для вимірювання повітряного зазору в генераторах / Левицький А. С., Зайцев Є. О., Кромпляс Б. А. ; заявник і патентовласник Інститут електродинаміки НАН України. – № а 2016 03404; заявл. 01.04.2016, опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1.
4. Левицький А.С. Визначення функції перетворення ємнісного сенсора повітряного зазору в гідрогенераторі СГК 538/160-70М / А.С. Левицький, Є.О. Зайцев, Б.А. Кромпляс // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ : Зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2016. Вип.43. С. 134–136.

ДОДАТОК Д

Довідка
про використання результатів наукової роботи

Підчібій Олександр Євгенівни

за темою: «Спеціалізована інформаційно-вимірювальна система контролю повітряного зазору між ротором та статором електричних машин»

Наукові дослідження проведені інженером Ік **О.Є. Підчібій**, які представлені в її магістерській дисертації, виконувались відповідно з держбюджетною темою «Розробка наукових засад створення нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання контрольно-діагностичних параметрів обладнання електростанцій» (шифр «ПАРАМЕТР», затверджена постановою Бюро ВФТПЕ НАН України пр. №11 від 05.07.2016 р.), 2017 – 2021 рр., №ДР 0116U007285 Інституту електродинаміки Національної академії наук України.

Робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання створення рекомендацій із вибору типу та реалізації методики розрахунку оптимальних конструктивних параметрів первинних вимірювальні перетворювачі(сенсорів) системи контролю потужного генеруючого обладнання з відновлювальними джерелами енергії, а саме гідрогенераторів ПрАТ«Укргідроенерго».

Практична значимість отриманих результатів Підчібій О.Є. полягає в тому, що отримані комп'ютерні моделі дозволили значно спростити процес дослідження технічних та метрологічних характеристик сенсорів.

В подальшому передбачається використання отриманих результатів для побудови та практичної реалізації засобів та методів багатопараметрового контролю взаємопов'язаних процесів різної природи в реальному часі, що призводять до зміни фактичних технічних характеристик потужних генеруючих машин ТЕС, АЕС, ГЕС, ГАЕС.

Провідний науковий співробітник
відділу електричних і магнітних
вимірювань
Інституту НАН України,
доктор техн. наук, старший наук. сп.

Старший науковий співробітник
відділу електричних і магнітних
вимірювань
Інституту НАН України,
доктор техн. наук, старший наук. сп.

А.С. Левицький

Зайцева Є.О.

Є.О. Зайцев